

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Robert Mlaker

IZRAČUN TOKOV V VZPOREDNO VEZANIH VODNIKIH
TRIFAZNIH KABLOVODOV

MAGISTRSKO DELO

Mentor: doc.dr. Maks Berlec

Ljubljana, 2006

ORIGINAL TEMA MAGISTRSKE NALOGE

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju doc. dr. Maksu Berlecu za strokovno vodstvo in napotke pri izdelavi magistrske naloge. Posebno se zahvaljujem tudi prof. dr. Konradu Lenasiju za vodstvo in usmerjanje med študijem, kot tudi za svetovanje pri izdelavi magistrske naloge. Prav tako se zahvaljujem vsem, ki so mi tako ali drugače pomagali in me vzpodbujali pri izdelavi magistrske naloge.

KAZALO

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV.....	I
1. POVZETEK	1
2. UVOD.....	5
2.1 RAZPOREDITEV TOKOV PRI NORMALNI OBREMENITVI KABLOVODA	5
2.2 KRATKOSTIČNE RAZMERE V VZPOREDNO VEZANIH TOKOKROGIH.....	6
2.3 PROGRAM ZA IZRAČUN TOKOV V VZPOREDNO VEZANIH VODNIKIHI.....	7
2.4 KONKRETNI PRIMER NA KATEREGA SE NAVEZUJEJO IZRAČUNI.....	8
3. OPIS METODE IZRAČUNA.....	10
3.1 TEORETIČNA PODLAGA PORAZDELITVE TOKOV V DELJENIH TOKOKROGIHI.....	12
3.1.1 <i>Notranja impedanca ravnega vodnika krožnega preseka.....</i>	<i>12</i>
3.2 NAPETOSTNA ENAČBA ZANKE V SNOPI VZPOREDNO VEZANIH VODNIKOV	20
3.2.1 <i>Izračun magnetnega pretoka skozi zanko, ki jo tvorita dva ravna, vzporedno priključena vodnika.....</i>	<i>27</i>
3.2.2 <i>Pravila, ki so bila upoštevana pri določanju magnetnih pretokov v zankah....</i>	<i>33</i>
3.2.3 <i>Sistem enačb za analizo nadomestnega vezja.....</i>	<i>37</i>
3.3 REŠEVANJE SISTEMA ENAČB IN UPORABA REZULTATOV	45
3.3.1 <i>Določitev korekcijskega faktorja (k_n).....</i>	<i>45</i>
3.3.2 <i>Kratkostične impedance kablovoda.....</i>	<i>47</i>
3.4 PRIMER IZRAČUNA PORAZDELITVE TOKOV.....	54
4. SKLEPNE UGOTOVITVE	84
5. SEZNAM UPORABLJENIH VIROV	86

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

\vec{A}	magnetni vektorski potencial
t	čas
V	električni potencial
γ	specifična prevodnost
μ	magnetna permeabilnost
A_r	realna komponenta fazorja magnetnega vektorskega potenciala
A_i	imaginarna komponenta fazorja magnetnega vektorskega potenciala
V_r	realna komponenta fazorja električnega potenciala
V_i	imaginarna komponenta fazorja električnega potenciala
ω	krožna frekvenca
n_v	število vzporedno vezanih tokokrogov
\underline{Z}_0	notranja impedanca vodnika
r_v	polmer vodnika (prevodni del)
\underline{I}	tok
\underline{Z}	impedanca
ΔU	padec napetosti
\underline{J}	gostota toka
H	magnetna poljska jakost
E	električna poljska jakost
E_v	gradientna električna poljska jakost
E_{ind}	inducirana električna poljska jakost
k	valovno število
φ	koordinata v krožno valjnem koordinatnem sistemu
z	koordinata v krožno valjnem koordinatnem sistemu
r	koordinata v krožno valjnem koordinatnem sistemu
J_z	komponenta gostote toka v smeri koordinate z
$N_o(x)$	Neumannova funkcija ničtega reda
$J_o(x)$	Besselova funkcija ničtega reda
H_φ	komponenta magnetne poljske jakosti H v smeri koordinate φ
$J_1(x)$	Besselova funkcija prvega reda
r_v	notranji polmer vodnika (do površine prevodnika)
ℓ	integracijska kontura
s	pot
l	dolžina kablovoda
\underline{Z}_v	impedanca vodnika
\underline{Z}_i	zunanja impedanca vodnika
μ_0	magnetna permeabilnost praznega prostora
d_{ij}	medosna razdalja med vodnikom z indeksom i in vodnikom z indeksom j
γ_j	specifična prevodnost vodnika z indeksom j
r_{vj}	notranji polmer (polmer prevodnega dela) vodnika z indeksom j
k_j	valovno število vodnika z indeksom j
\underline{I}_j	tok v vodniku z indeksom j
\underline{I}_{L1}	vsota tokov v vseh vodnikih, ki so priključeni na fazo L_1
\underline{I}_{L2}	vsota tokov v vseh vodnikih, ki so priključeni na fazo L_2

\underline{I}_{L3}	vsota tokov v vseh vodnikih, ki so priključeni na fazo L_3
\underline{Z}_i	impedanca posameznega vodnika z indeksom i
I_o	predpostavljeni tok bremena
\underline{U}_j	inducirana napetost v zanki z indeksom j
$\underline{\Phi}_j$	magnetni pretok v zanki z indeksom j
B_j	gostota magnetnega polja v področju zanke z indeksom j
E_j	inducirana električna poljska jakost na konturi, ki jo določa geometrija zanke z indeksom j
S	površina
\underline{Z}_{0k}	notranja impedanca vodnika z indeksom k
B	gostota magnetnega polja
Φ	magnetni pretok
\underline{Z}_m	dodatna impedanca (impedanca transformatorja in omrežja)
\underline{U}_{Li}	fazna napetost faze z indeksom i
\underline{I}_{Li}	vsota tokov v vseh vodnikih, ki so priključeni na fazo z indeksom i
$\underline{\Phi}_{ji}$	delež magnetnega pretoka v zanki z indeksom j , ki ga povzroča tok v vodniku z indeksom i
\vec{r}_j	krajevni vektor do vodnika z indeksom j
\vec{r}_j'	krajevni vektor do zrcalne slike vodnika z indeksom j
m	število vzporedno priključenih zaščitno nevtralnih vodnikov
\underline{I}_{PE}	tok v snopu zaščitno nevtralnih vodnikov
N	število vodnikov v kablovodu (vsota faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov)
d'_{xy}	medosna razdalja med vodnikom x in zrcalno sliko vodnika y preko feromagnetne podlage
U_{nf}	nazivna fazna napetost
\underline{Z}_d	direktna komponenta kratkostične impedance
\underline{Z}_i	inverzna komponenta kratkostične impedance
\underline{Z}_0	nična komponenta kratkostične impedance
\underline{Z}_{ns}	nadomestna kratkostična impedanca pri enopolnem kratkem stiku
u_L	padec napetosti na snopu vodnikov določene faze
\underline{Z}_L	impedanca snopa vodnikov določene faze
\underline{I}_L	skupni tok v snopu vodnikov določene faze
$\underline{\Phi}_{cxy}$	celotni magnetni pretok skozi zanko, ki jo sestavljata vodnik z indeksom x in vodnik z indeksom y
\underline{Z}_{xy}	medsebojna impedanca med vodnikom z indeksom x in vodnikom z indeksom y (podaja delež inducirane napetosti v vodniku z indeksom x , zaradi toka v vodniku z indeksom y)
$d_{x'y}$	medosna razdalja med vodnikom y in zrcalno sliko vodnika x preko feromagnetne podlage
S_n	nazivna moč transformatorja
U_n	nazivna napetost
u_k	kratkostična napetost transformatorja
P_{cu}	nazivne joulske izgube transformatorja
I_{nt}	nazivni tok transformatorja
k_t	korekcijski faktor kablovoda, ki zajame vpliv temperature okolice
k_v	korekcijski faktor kablovoda, ki zajame vpliv medsebojnega segrevanja vodnikov, če je na kabelski trasi več tokokrogov
k_n	korekcijski faktor s katerim se ovrednoti neenakomerno razporeditev tokov v paralelno priključenih tokokrogih

I_z	zdržni tok kablovoda
I_{zv}	zdržni tok vodnika
I_t	trajno dovoljeni tok vodnika
$I_{t\ min}$	najmanjši dopustni trajno dovoljeni tok vodnika
S_{min}	najmanjši presek vodnika, ki ima trajno dovoljeni tok večji od najmanjšega dopustnega trajno dovoljenega toka
P_{izg}	joulske izgube kablovoda
I_e	efektivni tok v posameznem vodniku ob enakomerni razporeditvi tokov
Z_t	absolutna direktna impedanca transformatorja
R_t	direktna upornost transformatorja
X_t	direktna reaktanca transformatorja
C_{ro}	razmerje med nično upornostjo in direktno upornostjo transformatorja
C_{xo}	razmerje med nično reaktanco in nično upornostjo transformatorja
\underline{Z}_{dt}	direktna impedanca transformatorja
\underline{Z}_{0t}	nična impedanca transformatorja
\underline{Z}_{k3}	impedanca snopa faznih vodnikov
I_{k3}	tok tripolnega kratkega stika

1. POVZETEK

Pričujoče delo obravnava porazdelitev tokov v nizkonapetostnih vzporedno vezanih tokokrogih, ki so izvedeni z enožilnimi kabli, in sicer pri različnih geometrijah polaganja faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov. Pri tem je bil predpostavljen trifazni simetrični tokovni sistem pri frekvenci 50 Hz. Zaradi različnih medsebojnih induktivnosti se tokovi po vodnikih razporedijo neenakomerno, kar je pokazano z izračunom razporeditve tokov s pomočjo analize nadomestnih vezij v frekvenčnem prostoru. Določene so bile tudi toplotne izgube v vodnikih, impedance kablovoda in kratkostični tokovi. Prikazan je tudi način določanja korekcijskega faktorja, s katerim se ovrednoti neenakomerno porazdelitev tokov po vodnikih. Pri projektiranju takih kablovodov se s tem faktorjem zmanjša s predpisi določene zdržne tokove, tako da temperatura najbolj obremenjenega vodnika ne preseže še dopustne vrednosti. Trajno dovoljeni tokovi (ali zdržni tokovi) kablov so namreč določeni s predpisi, ki za vzporedno vezane vodnike predpostavljajo enakomerno porazdelitev tokov.

Porazdelitev tokov je odvisna tudi od geometrije in materiala kabljskih polic. Zato je bila izvedena analiza paralelnih tokokrogov, ki so bili inštalirani na ravne kabljske police iz plastičnega in feromagnetnega materiala.

Izračuni so bili izdelani z računalniškim programom, ki je bil napravljen namensko za analizo obravnavane problematike. Program v odvisnosti od geometrije razvrstitve vodnikov generira sistem enačb, katerega razreši numerično.

Izvedle so se primerjave rezultatov za tri glavne načine razvrščanja vodnikov. Pri prvem načinu so vodniki določene faze razvrščeni soležno v vodoravno zaporedje. Pri drugem načinu so soležno položeni vodniki, ki ne pripadajo isti fazi. Pri tretjem načinu pa so vodniki posameznega tokokroga razporejeni v trikotno obliko.

Izkaže se, da se najbolj enakomerno obremenitev vodnikov doseže, če so vodniki posameznega tokokroga razporejeni v trikotno obliko, na obeh straneh tokokroga pa sta položena zaščitno nevtralna vodnika.

Največja neenakomerna razporeditev tokov nastane, če so vodniki, ki pripadajo isti fazi, geometrijsko razporejeni v skupino, zato lahko pri napačnem dimenzioniranju (to je pri predvidevanju enakomerne razporeditve tokov) nastopijo preobremenitve posameznih vodnikov.

Kabljske police iz feromagnetnega materiala še dodatno zmanjšajo enakomernost porazdelitve tokov, hkrati pa zvečajo kratkostične impedance. Pri enopolnih kratkih stikih

(stik fazni vodnik-zaščitno nevtralni vodnik) stečejo inducirani tokovi tudi v vodnikih, ki pripadajo zdravim fazam, saj vsi vzporedno priključeni vodniki tvorijo kratkostične zanke. Pri določenih položajih zaščitno nevtralnih vodnikov so tokovi v vodnikih zdravih faz lahko celo večji od tokov v okvarjeni fazi. V kolikor so vodniki ščiteni posamično z varovalkami, lahko pregorijo tudi varovalke, ki ščitijo vodnike v zdravih fazah.

Ključne besede: vodnik, kablovod, notranja impedanca, induciranje, neenakomernost, razporeditev tokov, simetrija, razvrstitev vodnikov, korekcijski faktor, zdržni tok.

1. ABSTRACT

The assignment treats distribution of currents in low-voltage parallel bound circuits that are performed with one-core cables at different geometries of phase and protective-neutral conductors placing. The three-phase symmetrical current system at the frequency of 50 Hz was supposed here. Generally, the currents distribute unequally on conductors due to different mutual inductivity. The calculation of distribution of the currents is shown with the analysis of electric circuits in the frequency space. Heat losses were stated, impedances of cable-wires and currents of short circuits. The way of determining the correctional factor the unequal distribution of currents in conductors is assessed with is also shown. When projecting such cable-wires, with this factor the regulated allowed currents are reduced, so the temperature in the conductor that is most burdened does not exceed the allowed value. The regulations in tables for sheaves of conductors present sustainable currents with supposition that currents are distributed equally.

Distribution of currents also depends on geometry and material the cable shelves are made of. The analysis of the parallel circuits that were installed on flat shelves made of PVC and ferromagnetic material was carried out.

The calculations were made with a computer programme made for the analysis of the discussed problems. In dependence with geometry setting of the conductors the programme generates a system of equations and solves them numerically.

Comparisons of results for three main ways of setting conductors were also carried out. In the first way, the conductors are set into a horizontal sequence, where the conductors that belong to the same phase, are arranged into butt joints. In the second way there are the butt-joint conductors that do not belong to the same phase. In the third way the conductors of a separate circuit are arranged into a triangular shape.

The most equal burdening is if the conductors of a separate circuit are arranged into a triangular shape, and on both sides of the circuit there are protective neutral conductors laid.

The most unequal distribution is if the conductors that belong to the same phase are geometrically arranged into a group.

Cable shelves made of ferromagnetic material additionally reduce the equability of conductors and at the same time increase the short-circuit impedances. In one-pole short circuits (circuit phase conductor – protective-neutral conductor) the induced currents go also into the conductors that belong to healthy phases, as parallel connected conductors create short-circuit

nodes. At certain positions protective-neutral conductors the currents in healthy-phases conductors can be even bigger than in the damaged phase. If the conductors are protected separately with fuses, besides fuses in the damaged phase, the fuses that protect conductors in undamaged phases could as well blow.

Key words: conductor, cable-wire, inner impedance, inducing, equability, current distribution, symmetry, arrangement of conductors, correctional factor, sustainable current.

2. UVOD

Pri načrtovanju nizkonapetostnih kablovodov se napajanje močnejših porabnikov pogosto izvede z vzporedno vezanimi enožilnimi kabli, kjer so preseki v območju velikosti 95-300 mm². Vzrok je v lažji izvedbi kablovoda, večji dostopnosti kablov na trgu in krajših dobavnih rokih. Enožilni kabli so namreč od večžilnih lažji in imajo manjše upogibne radije. Pogost primer take izvedbe kablovoda je povezava med sekundarjem distribucijskega energetskega transformatorja in glavnim nizkonapetostnim stikalnim blokom transformatorske postaje.

Pri takih kablovodih se tokovi, pri neustrezni geometrijski razporeditvi faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov, razporedijo zelo neenakomerno, kar ima za posledico preobremenitve posameznih vodnikov, po drugi strani pa neizkoriščenost preostalih vodnikov. To se seveda zgodi, če se pri dimenzioniranju kablovoda predpostavi enakomerno porazdelitev tokov.

V pričujočem delu je najprej osvetljena teoretična podlaga, ki je bila uporabljena pri izračunih, ki zaobsegajo porazdelitve tokov pri normalni obremenitvi kablovoda s trifaznim simetričnim bremenom in kratkostične tokove kablovoda.

Na koncu je nakazana še problematika skupnega ali posamičnega varovanja vzporedno vezanih tokokrogov.

2.1 Razporeditev tokov pri normalni obremenitvi kablovoda

Ta sklop naloge obravnava razporeditev tokov in joulske izgube v paralelno vezanih kablinskih vodnikih v trifaznem simetričnem sistemu, in sicer pri normalni obremenitvi kablovoda. Prerezi vseh vodnikov v sistemu so enaki in okrogle oblike, prevodni del pa je bakren. Impedanca bremena je v splošnem mnogo večja od impedance omrežja in kablovoda. Zato je bilo breme nadomeščeno s tremi tokovnimi generatorji, ki generirajo tokove enakih amplitud z medsebojnimi faznimi zamiki 120°, 240° in 360°. Zaradi geometrijsko nesimetrične razporeditve vodnikov in posledično neenakih medsebojnih induktivnosti se tokovi v posameznih vodnikih v splošnem razporedijo neenakomerno, kar pomeni, da je treba trajno dovoljene tokove vodnikov iz tabel proizvajalcev in standardov korigirati za določen faktor tako, da najbolj obremenjeni vodniki niso preobremenjeni. Pri določanju razporeditve tokov v faznih vodnikih je bil upoštevan tudi vpliv vzporedno vezanih zaščitno nevtralnih vodnikov (PEN vodnikov), ki se običajno polagajo poleg faznih vodnikov. Cilj obdelave

opisane problematike je bilo ravno ovrednotenje omenjenega faktorja pri različnih geometrijah polaganja vodnikov, in sicer z analizo ustreznega nadomestnega vezja. Analiza vezja je bila izvedena numerično s pomočjo računalniškega programa, ki je bil izdelan kot pripomoček pri nastajanju naloge. Program se lahko uporablja pri projektiranju močnejših kabelskih povezav, ki so izvedene z vzporedno vezanimi enožilnimi vodniki. Tipičen primer take povezave je kabelsko napajanje nizkonapetostnih razdelilnih stikalnih blokov v transformatorskih postajah. Dimenzioniranje kabelske povezave med transformatorjem in pripadajočim stikalnim blokom je prikazan na konkretnem primeru transformatorja moči 1 MVA (20/0,4 kV).

2.2 Kratkostične razmere v vzporedno vezanih tokokrogih

Razvrstitev vodnikov močno vpliva tudi na kratkostične razmere v kablovodih, ki so izvedeni z vzporedno vezanimi vodniki. Tudi za vpogled v to problematiko je bil izdelan poseben računalniški program, ki numerično izračunava kratkostične tokove in impedance vodnikov za tripolne in enopolne kratke stike, in sicer za različne vrste geometrije polaganja faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov. Pri tem je bilo uporabljeno nadomestno vezje s tremi napetostnimi generatorji, ki tvorijo direktni trifazni simetrični sistem. Zaradi nesimetrične razvrstitve vodnikov se izračunane kratkostične impedance in tokovi med sabo občutno razlikujejo, velik vpliv na enopolne kratke stike pa imajo tudi položaji nevtralno zaščitnih vodnikov. Cilj tega sklopa naloge je bil, da se za določeno konfiguracijo polaganja vodnikov določi kratkostične tokove pri tripolnem (L_1 - L_2 - L_3) in vseh treh enopolnih kratkih stikih (L_1 -PEN, L_2 -PEN in L_3 -PEN). Izračunane kratkostične impedance se lahko uporabi za določanje kratkostičnih razmer v tokokrogih, ki so serijsko vezani z obravnavanim kablovodom. Rezultate analize kratkih stikov se v praksi uporablja za ustrezno dimenzioniranje elementov v stikalnem bloku kot tudi za nastavitev kratkostične zaščite, tokovi enopolnega kratkega stika pa so pri projektiranju obvezen podatek za preverjanje ustreznosti zaščite pred posrednim dotikom. Program pri izračunavanju kratkostičnih tokov upošteva tudi impedanco energetskih transformatorjev. S tem lahko hitro preverimo, kakšna razporeditev faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov nudi ugodnejše enopolne kratkostične tokove kablovoda, ki povezuje transformator in nizkonapetostni razdelilni stikalni blok.

Ker se kable inštalira v glavnem na železne police je bil z metodo zrcaljenja določen tudi vpliv feromagnetne podlage na porazdelitev tokov oziroma na kratkostične impedance. V takih primerih postane porazdelitev tokov bolj nesimetrična glede na porazdelitev tokov pri

kabelskih nosilcih iz neferomagnetnega materiala, kratkostični tokovi pa se zmanjšajo, kar je posledica povečane induktivnosti. Predočen je primer izračuna kratkostičnih tokov v stikalnem bloku, ki je z enožilnimi kabli priključen na transformator moči 1000 kVA, in sicer za nekatere vnaprej določene primere razvrščanja vodnikov. Izračuni so bili izvedeni pri omrežni frekvenci 50 Hz.

2.3 Program za izračun tokov v vzporedno vezanih vodnikih

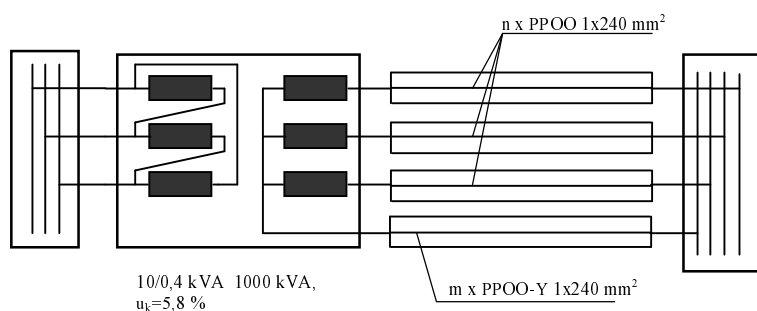
V raznih priročnikih so v glavnem podane samo reaktance za vodnike, ki so položeni v trikotno formo ali pa v eno plast v ravnini, pa še to samo za en tokokrog, ne podajajo pa vrednosti impedanc za paralelno vezane tokokroge, ki so izvedeni z enožilnimi vodniki. Impedanca kablovoda je namreč v splošnem odvisna od geometrije polaganja faznih in zaščitnih vodnikov. Za izračune parametrov kablovoda sta bila zato izdelana dva programa. Prvi program prikaže razporeditev tokov pri simetrični tokovni obremenitvi kablovoda, drugi pa obravnava impedance in porazdelitev tokov pri enopolnem in tripolnem kratkem stiku. Oba programa delujeta samostojno v "windows" okolju, izvedena pa sta v razvojnem orodju Delphi. Programa numerično rešujeta sisteme linearnih kompleksnih enačb, ki opisujejo ustrezna nadomestna vezja. Glavna dela programov sta:

- postopek, ki glede na razporeditev vodnikov avtomatsko generira ustrezni sistem linearnih kompleksnih enačb v matrični obliki in
- postopek, ki numerično razreši sistem linearnih enačb in sicer s pomočjo direktne Gaussove eliminacijske metode.

Rezultate program podaja tabelarično in grafično s stolpnim ter kazalčnim diagramom.

2.4 Konkretni primer na katerega se navezujejo izračuni

Konkretni izračuni so bili izvedeni na primeru kablovoda v dolžini 20 m, ki povezuje sekundar distribucijskega transformatorja nazivne moči 1000 kVA z nizkonapetostnim razdelilnim stikalnim blokom.

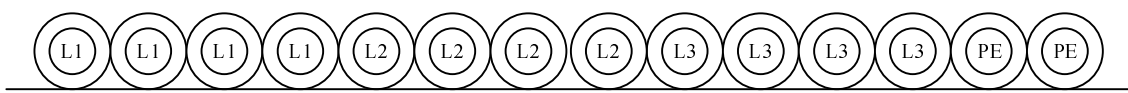


Slika 2.4.1: Povezava transformatorja z nizkonapetostnim stikalnim blokom

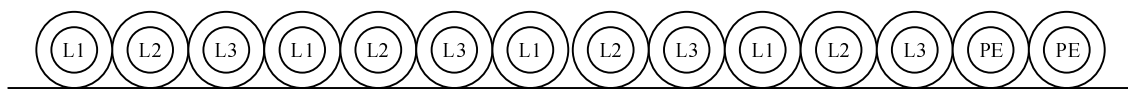
Za tak kablovod je prikazan postopek dimenzioniranja na zdržni tok v normalnem obratovanju, in sicer za naslednje vrste razporejanja vodnikov:

- v vodoravno zaporedje so razvrščeni vodniki, ki pripadajo isti fazi, in sicer v eno plast (slika 2.4.2);
- v vodoravno zaporedje so razvrščeni vodniki, ki ne pripadajo isti fazi, in sicer v eno plast (slika 2.4.3);
- vodniki, ki ne pripadajo isti fazi so razporejeni v trikotne forme (slika 2.4.4);
- vodniki, ki ne pripadajo isti fazi so razporejeni v trikotne forme, poleg vsake skupine pa je položen še zaščitno nevtralni vodnik (slika 2.4.5) in
- vodniki, ki ne pripadajo isti fazi so razporejeni v vodoravno zaporedje, poleg vsake skupine pa je položen še zaščitno nevtralni vodnik (slika 2.4.6).

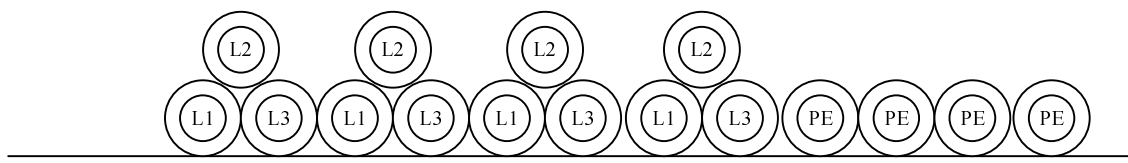
Pri tem so bili kot gradniki kablovoda izbrani vodniki s plastično izolacijo (PPOO). V sklopu dimenzioniranja so bile poleg porazdelitve tokov v vodnikih določene tudi joulske izgube in kratkostični tokovi.



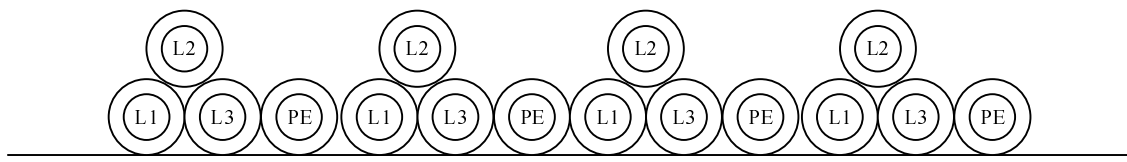
Slika 2.4.2: V vodoravno zaporedje so razporejeni vodniki, ki pripadajo isti fazi



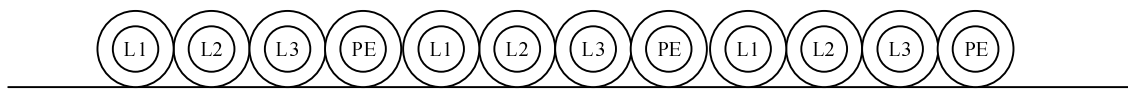
Slika 2.4.3: V vodoravno zaporedje so razporejeni vodniki, ki ne pripadajo isti fazi



Slika 2.4.4: Razporejanje faznih vodnikov v trikotno formo; PE vodniki so razvrščeni v skupino na zunanji strani kablovoda



Slika 2.4.5: Razporejanje faznih vodnikov v trikotno formo; PE vodniki so razvrščeni posamezno, poleg vsake skupine faznih vodnikov



Slika 2.4.6: Razporejanje faznih vodnikov v vodoravno zaporedje; zaščitni vodniki (PE) so razvrščeni posamezno, poleg vsake skupine faznih vodnikov.

3. OPIS METODE IZRAČUNA

Porazdelitev tokov v vzporedno vezanih vodnikih se zaradi kompleksnosti problema ponavadi izračunava s podporo računalnika, in sicer na več načinov:

- z metodo končnih elementov,
- z metodo končnih diferenc in
- z analizo nadomestnega vezja.

Prvi dve metodi sta precej zamudni. Ob ustrezni postavitvi robnih pogojev lahko ponudita nekoliko bolj natančne rezultate, zato pa zahtevata veliko časa in boljšo računalniško opremo za numerično reševanje sistemov linearnih enačb. Enačba (3.1) je temeljna enačba, ki nam posredno omogoča izračun tokovnega polja.

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}(\vec{A})\right) = -\gamma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \gamma\operatorname{grad}(V) \quad (3.1)$$

\vec{A} predstavlja magnetni vektorski potencial, $\operatorname{grad}(V)$ pa pri obravnavani problematiki padeč napetosti vzdolž vodnika (na enoto dolžine).

Enačba (3.1) je vektorska, zato se jo lahko razdeli na tri skalarne diferencialne enačbe (vsaki koordinati pripada ena enačba). Diferencialne enačbe se pretvori v diferenčne, ki pa so linearne. Vsaki točki mreže se zato pripiše tri linearne enačbe, v kolikor pa se izračuni izvajajo v frekvenčnem prostoru, so te enačbe linearne in kompleksne. To pomeni, da diferenčne enačbe lahko razstavimo na realni in imaginarni del. Iz treh kompleksnih enačb tako dobimo v vsaki točki mreže sistem šestih realnih linearnih enačb. Enačbe iz vseh točk mreže pa tvorijo skupni sistem enačb, katerega se reši numerično.

Enačba (3.1) v frekvenčnem prostoru in za dvodimenzionalne probleme dobi obliko enačbe (3.2).

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}(\underline{A})\right) + j\omega\gamma\underline{A} = -\gamma\operatorname{grad}(\underline{V}) \quad (3.2)$$

Ker je ta enačba kompleksna, se le to prevede na reševanje sistema dveh realnih parcialnih diferencialnih enačb, in sicer tako, da se magnetni vektorski potencial in električni potencial zapišeta z enačbama (3.3) in (3.4).

$$\underline{A} = A_r + jA_i \quad (3.3)$$

$$\underline{V} = V_r + jV_i \quad (3.4)$$

Po vstavitvi enačb (3.3) in (3.4) v enačbo (3.2), se slednjo loči na realni (enačba 3.5) in imaginarni del (enačba 3.6).

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(A_r)\right) - \omega\gamma A_i = -\gamma \operatorname{grad}(V_r) \quad (3.5)$$

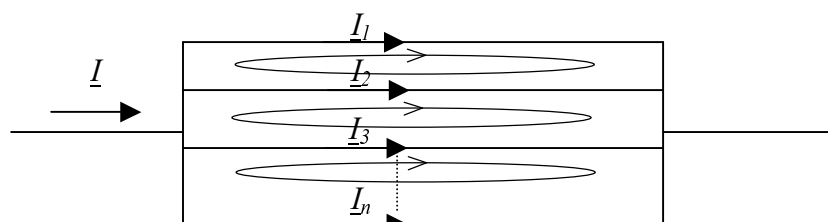
$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(A_i)\right) + \omega\gamma A_r = -\gamma \operatorname{grad}(V_i) \quad (3.6)$$

V mreži, ki definira geometrijo problema, lahko nastopa več desetisoč ali celo stottisoč točk. V vsaki točki pa je treba numerično določiti realni in imaginarni del magnetnega vektorskega potenciala (A_r in A_i), skratka dve neznanki. Pri vsem tem nastopajo tudi problemi v zvezi z določanjem ustreznih robnih pogojev. Pri analizi nadomestnih vezij, ki so uporabljena v tem delu, pa je število kompleksnih neznank enako številu vodnikov v kablovodu (v praktičnih primerih je v kablovodu do 40 vodnikov, kar pomeni 40 neznank).

Cene komercialnih programov, ki rešujejo probleme s končnimi elementi, niso ravno majhne in stanejo nekaj tisoč dolarjev. Zato sta ti dve metodi manj primerni za uporabo v projektantski praksi, kjer se pričakuje enostavnejše in hitrejše programe. Za reševanje takih problemov je za prakso primernejša analiza nadomestnega vezja, ki je prilagojen posameznemu problemu. Zaradi teh razlogov so izračuni izvedeni s pomočjo analize nadomestnih vezij, kjer se s pomočjo računalnika rešuje sistem kompleksnih linearnih enačb. Take programe lahko projektant z določeno mero veselja do programiranja napiše sam, in sicer z minimalnimi stroški.

3.1 Teoretična podlaga porazdelitve tokov v deljenih tokokrogih

Vzporedno priključeni vodniki v splošnem predstavljajo kratkostične zanke, saj so na začetku in na koncu tokokroga med seboj galvanjsko spojeni.



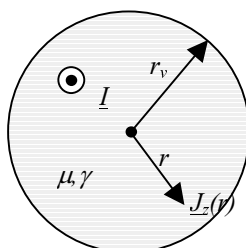
Slika 3.1.1: Načelni prikaz n -paralelno priključenih vodnikov

Elementa vsake take zanke sta v teh primerih dva enaka izolirana vodnika, ki imata pri zanemarljivem učinku sosedstvenega pojava enaki notranji impedanci \underline{Z}_o . Notranja impedanca vodnika \underline{Z}_o reflektira elektromagnetne razmere znotraj vodnika, brez upoštevanja magnetnega polja zaradi tokov v ostalih vodnikih. Pri izračunu notranje impedance vodnika je privzeto, da so vodniki ravni in neskončno dolgi, torej da gre za dvodimenzionalen problem. Tako predpostavko se lahko napravi zaradi tega, ker so odseki kablovodov v praksi skoraj vedno izvedeni v ravni liniji, premer vodnika pa je mnogo manjši od same dolžine kablovoda, kar pomeni, da je vpliv robnega pojava na začetku in koncu kablovoda zanemarljiv.

3.1.1 Notranja impedanca ravnega vodnika krožnega preseka

Notranja impedanca vodnika \underline{Z}_o predstavlja element, ki se v okviru izračunov porazdelitve tokov pojavlja v vseh nadomestnih vezjih in odraža posledice harmoničnega elektromagnetnega polja znotraj vodnika. Zato je na tem mestu prikazana pot do analitičnega ovrednotenja notranje impedance vodnika in sicer brez vpliva sosednjih vodnikov.

Obravnavani vodnik ima polmer r_v , permeabilnost μ , relativno prevodnost γ in vodi harmonični tok \underline{I} krožne frekvence ω .



Slika 3.1.1.1: Presek ravnega vodnika, ki vodi harmonični tok \underline{I}

Impedanco vodnika izračunamo s kvocientom padca napetosti na vodniku in toka, ki teče skozi ta vodnik:

$$\underline{Z}_v = \frac{\Delta \underline{U}}{\underline{I}} \quad (3.1.1.0)$$

Pri nekem znanem toku \underline{I} je treba določiti padec napetosti $\Delta \underline{U}$, in sicer s pomočjo naslednjih Maxwellovih enačb:

$$\vec{\underline{J}} = \text{rot}(\vec{\underline{H}}) \quad (3.1.1.1)$$

$$\text{rot}(\vec{\underline{E}}) + j\omega\mu\vec{\underline{H}} = 0 \quad (3.1.1.2)$$

Električna poljska jakost \underline{E} v vodniku je vsota gradientne \underline{E}_v , ki je v povezavi s potencialom vzdolž vodnika in inducirane električne poljske jakosti \underline{E}_{ind} , ki nastane zaradi časovno spremenljivega magnetnega pretoka. Za skupno električno poljsko jakost velja enačba (3.1.1.3).

$$\vec{\underline{E}} = \frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma} \quad (3.1.1.3)$$

Slednjo enačbo (3.1.1.3) se vstavi v enačbo (3.1.1.2), nakar nad to enačbo napravimo rotor. Pri tem se smatra, da je permeabilnost μ časovno in prostorsko konstantna.

$$\text{rot}\left(\frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma}\right) + j\omega\mu\vec{\underline{H}} = 0 \quad (3.1.1.4)$$

$$\text{rot rot}\left(\frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma}\right) + j\omega\mu \text{rot}(\vec{\underline{H}}) = 0 \quad (3.1.1.5)$$

Dvojni rotor se lahko izrazi kot razlika gradienta divergence in Laplace-ove funkcije.

$$\text{rot rot}\left(\frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma}\right) = \text{grad div}\left(\frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma}\right) - \text{div grad}\left(\frac{\vec{\underline{J}}}{\gamma}\right) \quad (3.1.1.6)$$

Prvi člen desne strani enačbe (3.1.1.6) odpade, saj je harmonično tokovno polje neizvorno:

$$\operatorname{div}(\vec{J}) = 0 \quad (3.1.1.7)$$

Enačba (3.1.1.4) se zato lahko zapiše z enačbo (3.1.1.8), kjer so snovne lastnosti prevodnika in frekvenca sistema zajete v konstanti \underline{k} (enačba 3.1.1.9), ki se imenuje tudi valovno število.

$$\operatorname{div} \operatorname{grad}(\vec{J}) + \underline{k}^2 \vec{J} = 0 \quad (3.1.1.8)$$

$$\underline{k}^2 = -j\omega\mu\gamma \quad (3.1.1.9)$$

Ker gre za dvodimenzionalni sistem, ima tokovna gostota vzdolžno smer oziroma smer toka v vodniku in je zaradi krožne in vzdolžne simetrije samo radialno odvisna funkcija.

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial \varphi} = \frac{\partial \vec{J}}{\partial z} = 0 \quad (3.1.1.10)$$

$$\vec{J} = (0, 0, \underline{J}_z(r)) \quad (3.1.1.11)$$

Zato od vektorske enačbe (3.1.1.8), ki v splošnem tvori sistem treh skalarnih enačb, ostane samo ena skalarna enačba (3.1.1.12), ki je zaradi skladnosti z geometrijo problema zapisana v krožno valjnem koordinatnem sistemu.

$$\frac{d^2 \underline{J}_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\underline{J}_z}{dr} + \underline{k}^2 \underline{J}_z = 0 \quad (3.1.1.12)$$

Slednja enačba (3.1.1.12) je Besselova ničtega reda. Splošni rešitvi take diferencialne enačbe sta Neumannova funkcija $N_0(\underline{k}r)$ in Besselova funkcija $J_0(\underline{k}r)$. Neumannove funkcije se pri obravnavani problematiki ne da uporabiti, ker pri $\underline{k}r=0$ postane singularna. Zato se v nastavku (enačba 3.1.1.13) matematičnega opisa razporeditve gostote toka v vodniku polnega krožnega prereza lahko uporabi samo Besselova funkcija.

$$\underline{J}_z(r) = \underline{C} J_0(\underline{k}r) \quad (3.1.1.13)$$

Konstanta \underline{C} je neznana in se lahko določi s pomočjo druge Maxwelllove enačbe:

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3.1.1.14)$$

Enačba (3.1.1.14) zavzame v frekvenčnem prostoru naslednjo obliko:

$$\text{rot}\left(\frac{\vec{J}}{\gamma}\right) = -j\mu\omega\vec{H} \rightarrow \text{rot}(\vec{J}) = -j\mu\omega\gamma\vec{H} = \underline{k}^2\vec{H} \quad (3.1.1.15)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\underline{k}^2} \text{rot}(\vec{J}) \quad (3.1.1.16)$$

Pri neskončno dolgih in ravnih vodnikih je različna od nič samo vzdolžna komponenta gostote toka J_z in zaradi tega obstaja samo H_φ komponenta magnetne poljske jakosti.

$$\vec{H} = (0, H_\varphi, 0) \quad (3.1.1.17)$$

Z upoštevanjem enačb (3.1.1.11), (3.1.1.13) in (3.1.1.17) ter lastnosti, da je $dJ_o(x)/dx = -J_I(x)$, se enačba (3.1.1.16) poenostavi v enačbo (3.1.1.18).

$$H_\varphi(r) = -\frac{1}{\underline{k}^2} \frac{dJ_z(r)}{dr} = \frac{C}{\underline{k}^2} J_1(\underline{k}r) \quad (3.1.1.18)$$

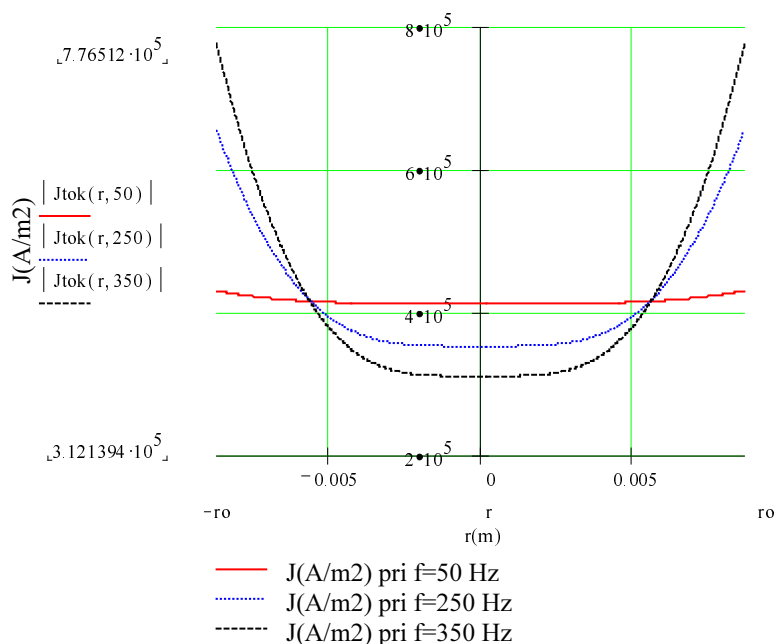
Neznano konstanto \underline{C} se na podlagi Amperovega zakona določi iz robnega pogoja za magnetno poljsko jakost, in sicer na plašču prevodnega dela vodnika ($H_\varphi = H_\varphi(r_v)$). S tem integracijska kontura ℓ zajame prerez po katerem teče celoten tok v vodniku.

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{s} = 2\pi r_v H_\varphi(r_v) = \underline{I} \Rightarrow H_\varphi(r_v) = \frac{\underline{I}}{2\pi r_v} = \frac{C}{\underline{k}} J_1(\underline{k}r_v) \Rightarrow \underline{C} = \underline{I} \frac{\underline{k}}{2\pi r_v J_1(\underline{k}r_v)} \quad (3.1.1.19)$$

Z vstavitvijo konstante \underline{C} (enačba 3.1.1.19) v enačbo (3.1.1.13) je že določeno tudi polje tokovne gostote v vodniku polnega krožnega preseka, brez vpliva sosednjih vodnikov:

$$\boxed{\underline{J}_z(r) = \frac{\underline{k}I}{2\pi r_v} \frac{J_o(\underline{k}r)}{J_1(\underline{k}r_v)}} \quad (3.1.1.20)$$

Na sliki 3.1.1.1.2 je predložen grafični potek funkcije (3.1.1.20) za primer bakrenega vodnika s presežkom 240 mm^2 , ki je pri različnih frekvencah obremenjen s tokom 100 A . Razvidna je neenakomerna porazdelitev gostote toka, ki se manifestira kot izriv toka proti površini vodnika. Izriv toka je veliko bolj intenziven pri frekvencah, ki so večje od omrežne frekvence. V tem primeru sta bili upoštevani frekvenci 250 Hz in 350 Hz , saj v industrijskih omrežjih pogosto spadata med najbolj intenzivne višjeharmonike, ki jih v glavnem generirajo 6-pulzni usmerniki.



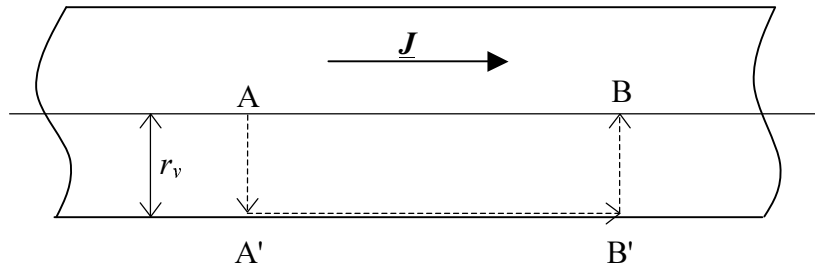
Slika 3.1.1.2: Potek gostote toka (po enačbi 3.1.1.20) v bakrenem vodniku krožnega prereza: $S=240 \text{ mm}^2$, $I=100 \text{ A}$, pri frekvencah 50 Hz , 250 Hz in 350 Hz

Enačba porazdelitve tokovne gostote (3.1.1.20) se uporabi za izračun padca napetosti vzdolž obravnavanega vodnika. Padec napetosti je določen z integralom gradientne električne poljske jakosti ($\underline{E}_v = -\text{grad}(\underline{V})$), le ta pa je razlika celotne ($\underline{E} = \underline{J}/\gamma$) in inducirane ($\underline{E}_{\text{ind}} = -j\omega \underline{A}_z$) električne poljske jakosti.

$$\frac{\vec{J}}{\gamma} = -\text{grad}(\underline{V}) - j\omega \vec{A} \quad (3.1.1.21)$$

$$\int_A^B \left(\frac{\vec{J}}{\gamma} + j\omega \vec{A} \right) d\vec{s} = \int_A^B -\text{grad}(\underline{V}) d\vec{s} = \underline{V}(A) - \underline{V}(B) = \underline{V}(A') - \underline{V}(B') = \Delta \underline{U} \quad (3.1.1.22)$$

Zaradi predpostavljenega dvodimenzionalnega problema ima tokovna gostota samo komponento vzdolžne smeri. Zato je električni potencial \underline{V} konstanten po površini prereza vodnika, ki je pravokotno postavljena na smer gostote toka. Glede na to, da sta na integracijskih odsekih AA' in B'B (slika 3.1.1.1.3) vektorja tokovne gostote in magnetnega potenciala pravokotna na smer poti integriranja, zadostuje linijska integracija samo na odseku A'B' (enačba 3.1.1.22).



Slika 3.1.1.3: Prikaz linije integriranja pri določanju padca napetosti (spada k enačbi 3.1.1.22)

Poleg tega je celoten tok po preseku vodnika razporejen rotacijsko in vzdolžno simetrično, zato navzven deluje kot linijski tok, ki teče v osi vodnika. Zaradi tega se lahko na površini vodnika magnetni vektorski potencial ovrednoti z enačbo, ki sicer velja za linijski tok:

$$\underline{A}_z(r) = \frac{\mu_o I}{2\pi} \ln \frac{1}{r} + C_a \quad (3.1.1.23)$$

V obravnavani problematiki razporeditve tokov gre vedno za tokovno zaključene snope vodnikov, kjer velja da je vsota vseh tokov enaka nič:

$$\sum_{j=1}^N I_j = 0 \quad (3.1.1.24)$$

Pri tem pogoju (3.1.1.24) se izkaže ([1], stran 242), da celotna magnetna energija vodnikov ni odvisna od konstante C_a , zato se lahko na tem mestu upošteva, da ima ta konstanta vrednost $C_a=0$.

V enačbi (3.1.1.22) se upošteva rešitvi za magnetni potencial \underline{A}_z (3.1.1.23) in tokovno gostoto \underline{J} (3.1.1.20) na površini vodnika, torej za spremenljivko r se postavi polmer vodnika ($r=r_v$).

$$\Delta \underline{U} = \int_A^{B'} \left(\frac{\underline{J}}{\gamma} + j\omega \underline{\vec{A}} \right) d\vec{s} = \left(\frac{J_z(r_v)}{\gamma} + j\omega \underline{A}_z(r_v) \right) l \quad (3.1.1.25)$$

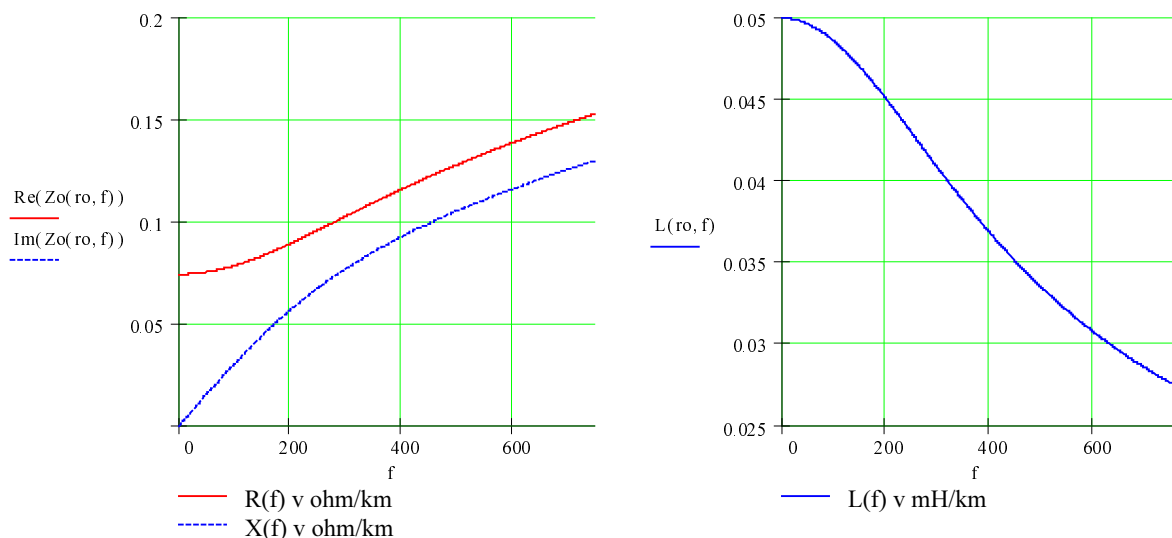
$$\Delta \underline{U} = \int_A^B \left(\frac{\vec{J}}{\gamma} + j\omega \vec{A} \right) d\vec{s} = \left(\frac{kI}{2\pi\gamma r_v} \frac{J_0(kr_v)}{J_1(kr_v)} + j\omega \frac{\mu_o I}{2\pi} \ln \frac{1}{r_v} \right) l \quad (3.1.1.26)$$

Impedanca vodnika krožnega preseka se preprosto določi, če se padec napetosti (3.1.1.26) deli s tokom vodnika, skladno z enačbo (3.1.1.27).

$$\underline{Z}_v = \frac{\Delta \underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 = \frac{kl}{2\pi\gamma r_v} \frac{J_0(kr_v)}{J_1(kr_v)} + j\omega \frac{\mu_o l}{2\pi} \ln \frac{1}{r_v} \quad (3.1.1.27)$$

Prvi sumand enačbe (3.1.1.27) je pri določanju raporeditve tokov najbolj zanimiv, saj predstavlja notranjo impedanco \underline{Z}_0 , ki povzema vpliv elektromagnetnega polja znotraj vodnika. Kot taka je sestavni del nadomestnega vezja s katerim se opiše sistem vzporedno vezanih tokokrogov. Dejstvo je, da izraz za notranjo impedanco upošteva tudi izriv toka v vodniku, kar se glede na razmere pri enakomerni razporeditvi gostote toka, kaže v povečani upornosti in zmanjšani induktivnosti vodnika. Slednje je razvidno tudi iz potekov komponent notranje impedance za bakreni vodnik prereza 240 mm^2 , v odvisnosti od frekvence toka (slika 3.1.1.1.4).

$$\underline{Z}_0 = \frac{kl}{2\pi\gamma r_v} \frac{J_0(kr_v)}{J_1(kr_v)} \quad (3.1.1.28)$$



Slika 3.1.1.4 : Frekvenčna odvisnost upornosti, notranje reaktance in notranje induktivnosti okroglega bakrenega vodnika s presekom $S=240 \text{ mm}^2$

Drugi del impedance \underline{Z} je zunanja impedanca \underline{Z}_1 , ki zajame vpliv zunanjega magnetnega polja, ki se razpreda od površine vodnika proti neskončnosti ($r > r_v$). Ta impedanca ima samo induktivno komponento, saj odseva samo vpliv zunanjega časovno spremenljivega magnetnega polja na inducirano električno poljsko jakost znotraj vodnika.

$$\underline{Z}_1 = j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{r_v} \quad (3.1.1.29)$$

Enačba za notranjo impedanco (3.1.1.28) velja točno samo, če je vodnik sam oziroma, če so ostali vodniki v dovolj veliki oddaljenosti. Velja ocena, da se učinek bližine lahko zanemari, če so medosne razdalje od ostalih vodnikov približno desetkrat večje od polmera r_v vodnika za katerega se računa impedanca ($d_{ij} > 10r_v$). V nasprotnem primeru, ko so si vodniki relativno blizu je potrebno pri notranji impedanci upoštevati še pribitek zaradi bližine ostalih vodnikov. V kolikor bi bili vsi vodniki z relativno permeabilnostjo $\mu = \mu_0$ in z različnimi prevodnostmi γ in polmeri r_{vj} , se notranjo impedanco i-tega vodnika da izraziti s približkom, ki ga določa enačba (3.1.1.30).

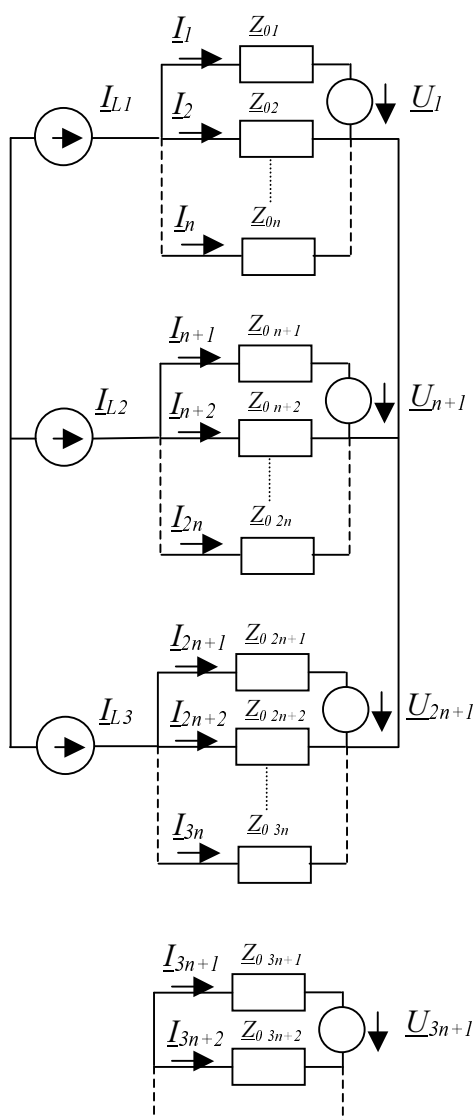
$$\underline{Z}_{0i} \cong \frac{k_i l}{2\pi\gamma_i r_{vi}} \frac{J_0(k_i r_{vi})}{J_1(k_i r_{vi})} - j \frac{\omega\mu_0 l}{2\pi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(1 - \frac{2J_1(k_j r_{vj})}{k_j r_{vj} J_0(k_j r_{vj})} \right) \left(\frac{r_{vj}}{d_{ij}} \right)^2 \quad (3.1.1.30)$$

V enačbi (3.1.1.30) indeksi j pripadajo ostalim vodnikom sistema, katerih tokovi vplivajo na porast notranje impedance vodnika z indeksom i .

3.2 Napetostna enačba zanke v snopu vzporedno vezanih vodnikov

Tokovi v vodnikih kablovoda so bili izračunani z reševanjem nadomestnega vezja po metodi vejnih tokov. Bistveno pri tem je, da je v napetostno enačbo določene zanke, poleg padcev napetosti na lastnih impedancah \underline{Z}_o , vključena tudi napetost, ki jo inducira časovno spremenljivi magnetni fluks, ki teče skozi površino obravnavane zanke.

Za izračun porazdelitve tokov v posameznih vodnikih sta bila uporabljena dva tipa nadomestnih vezij. Pri normalni simetrični obremenitvi kablovoda je bilo uporabljeno nadomestno vezje s tremi tokovnimi generatorji, ki nadomeščajo simetrično breme (slika 3.2.1).



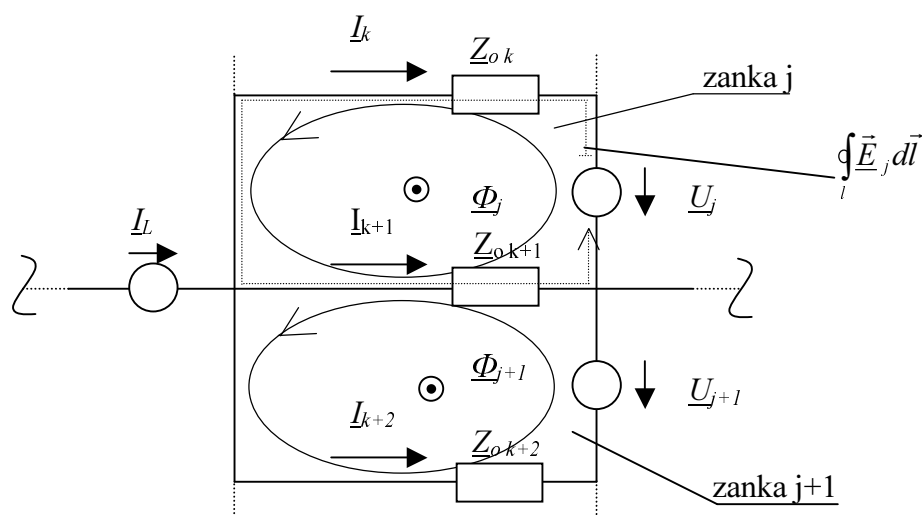
Slika 3.2.1 : Nadomestno vezje za izračun porazdelitve tokov v vodnikih pri normalni obremenitvi kablovoda s trifaznim simetričnim bremenom

Predpostavljeno je bilo, da je v vsakem faznem snopu kablovoda po n vodnikov, v snopu zaščitno nevtralnih vodnikov pa m vodnikov in da imajo vsi vodniki enake preseke in materiale. Tokovni generatorji tvorijo trifazni simetrični sistem, skladno s sklopom enačb (3.2.0).

$$\underline{I}_{L1} = I_o \quad \underline{I}_{L2} = I_o e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad \underline{I}_{L3} = I_o e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (3.2.0)$$

Na sliki 3.2.2 je prikazan izsek dveh zank iz nadomestnega vezja na sliki 3.2.1 v katerem nastopajo notranje impedance in napetostni generatorji, ki so v bistvu krmiljeni s tokovi v posameznih vodnikih.

Vsaki zanki pripada ustrezna napetostna ravnotežna enačba. Napetostni generator v določeni zanki nadomešča napetost, ki se inducira zaradi magnetnega polja v tej zanki. To magnetno polje je sestavljeno iz prispevkov magnetnih polj tokov vseh vodnikov. Predpostavljeno je, da v bližini ni nobenih tujih vodnikov, torej vodnikov, ki ne pripadajo obravnavanemu kablovodu.



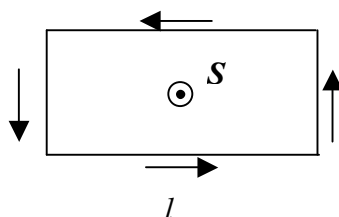
Slika 3.2.2 : Izsek dveh zank iz nadomestnega vezja na sliki 3.2.1

V j -ti zanki se inducira napetost:

$$\underline{U}_j = -j\omega \Phi_j = -j\omega \iint_S \vec{B}_j d\vec{S} = \oint_l \vec{E}_j d\vec{l} \quad (3.2.1)$$

Vodniki so v praksi ponavadi položeni na kabelske nosilce eden poleg drugega, torej brez medsebojnih razmikov. Zaradi tega notranje impedance vodnikov niso medsebojno enake tudi pri enakih polmerih in enakih specifičnih prevodnostih. Zato je splošnemu simbolu za notranjo impedanco \underline{Z}_0 treba dodati še ustrezen indeks k :

$$\begin{aligned} -\underline{I}_k \underline{Z}_{ok} + \underline{I}_{k+1} \underline{Z}_{ok+1} - \underline{U}_j &= 0 \\ -\underline{I}_k \underline{Z}_{ok} + \underline{I}_{k+1} \underline{Z}_{ok+1} + j\omega \underline{\Phi}_j &= 0 \end{aligned} \quad (3.2.2)$$



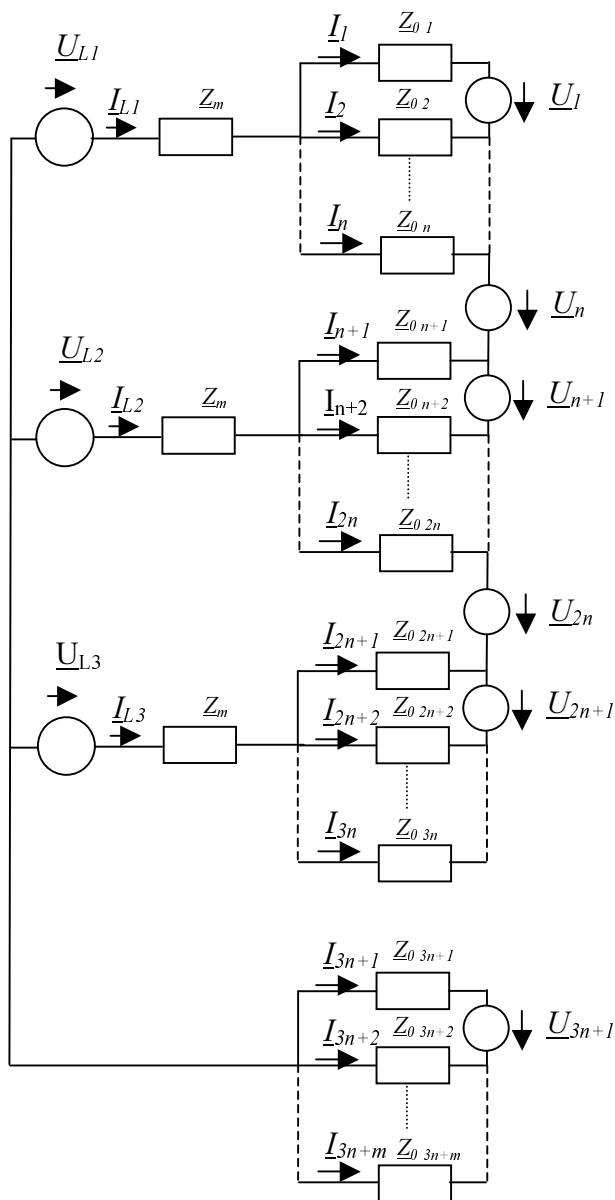
Slika 3.2.3: Prikaz referenčnih smeri obhoda l in integracijske ploskve, ki je napeta na zanko, ki jo tvorita dva paralelno vezana vodnika

Referenčna smer zanke l v linijskem integralu je v matematično pozitivni smeri. S svojo smerjo določa referenčno (pozitivno) smer ploskve S v ploskovnem integralu, s tem pa tudi toka v vodniku, magnetne gostote \underline{B} in fluksa $\underline{\Phi}$. Tok \underline{I}_{k+1} ima v tej zanki zato pozitivno smer, tok \underline{I}_k pa negativno. Na sliki 3.2.2 je smer napetosti generatorja \underline{U}_j , ki nadomešča inducirano napetost v j -ti zanki, postavljena tako, da je smer inducirane električne poljske jakosti v vodnikih v smeri linijske integracije, to je v matematično pozitivni smeri in je skladna s smerjo obhoda zanke. Zato je inducirana napetost \underline{U}_j v enačbi (3.2.2) predznačena negativno. Magnetni pretok $\underline{\Phi}$ se določi z vsoto prispevkov magnetnih pretokov zaradi tokov v vseh vodnikih kablovoda (enačba 3.2.3). Pri tem se indeks j nanaša na zanko, i pa je indeks vodnika oziroma toka.

$$\underline{\Phi}_j = \sum_{i=1}^N \underline{\Phi}_{j,i} \quad (3.2.3)$$

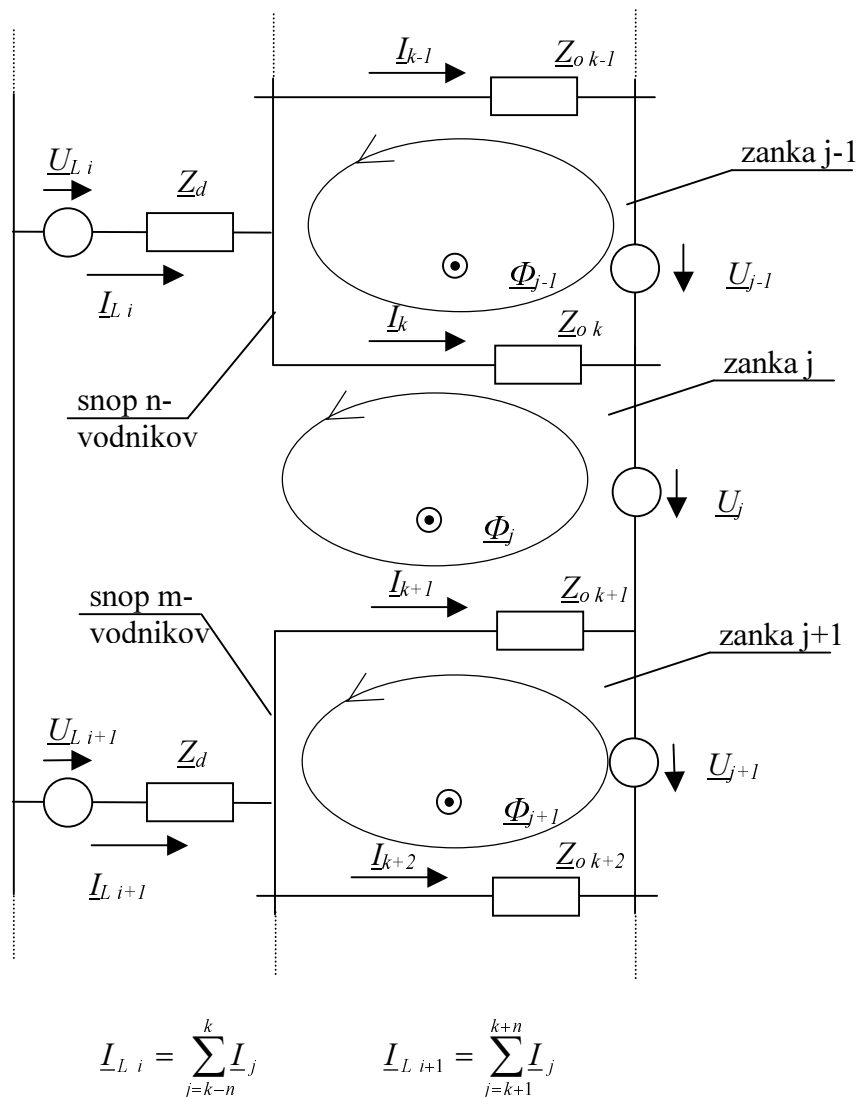
Za izračune kratkostičnih razmer so bili namesto tokovnih generatorjev uporabljeni napetostni (slika 3.2.4), ki predstavljajo generatorje v omrežju in dodatne impedance \underline{Z}_m , ki predstavljajo impedance omrežja oziroma dodatne impedance v kratkostičnem tokokrogu. Če je kablovod priključen direktno na nizkonapetostni stikalni blok v transformatorski postaji, je impedanca \underline{Z}_m vsota impedanc distribucijskega transformatorja in impedance preostalega sredjenapetostnega in visokonapetostnega omrežja. Na sliki 3.2.4 je prikazano nadomestno vezje, ki je primerno za izračun kratkostičnega toka oziroma kratkostičnih impedanc

kablovoda pri tripolnem kratkem stiku. Za razliko od vezja na sliki 3.2.2, sta na tem nadomestnem vezju (slika 3.2.4) dva tipa zank. Prvi tip zanke tvorijo samo vodniki, ki pripadajo določenemu faznemu ali zaščitno nevtralnemu snopu vodnikov. Za take zanke se uporabi ravnotežna napetostna enačba (3.2.2). Drugi tip zank so zanke, ki jih sestavljata po dva vodnika, ki pripadata različnim fazam. Značilnost nadomestnega vezja s tokovnimi generatorji (na sliki 3.2.2) je, da v njem nastopajo samo zanke prvega tipa.



Slika 3.2.4 : Nadomestno vezje za izračun porazdelitve tokov pri tripolni kratkostični obremenitvi kablovoda

Na sliki 3.2.5 je narisana izsek treh zank iz nadomestnega vezja (slika 3.2.4), ki je namenjen izračunu kratkostičnih tokov.



Slika 3.2.5: Nadomestno vezje j -te zanke v katero sta vključena dodatna napetostna generatorja

Zanki $(j-1)$ in $(j+1)$ sta že definirani z enačbo (3.2.2), saj ne vsebujeta omrežne napetosti. V napetostni enačbi za j -to zanko sta, poleg notranje impedance in inducirane napetosti, upoštevani tudi napetost omrežja ($\underline{U}_{L\ i}$ in $\underline{U}_{L\ i+1}$) in dodatna impedanca \underline{Z}_m , ki zaobsega impedanco omrežja. Zančno enačbo za j -to zanko podaja enačba (3.2.4).

$$-\underline{U}_{L\ i} + \underline{U}_{L\ i+1} - \sum_{j=k-n}^k \underline{I}_j \underline{Z}_m + \sum_{j=k+1}^{k+n} \underline{I}_j \underline{Z}_m - \underline{I}_k \underline{Z}_{0k} + \underline{I}_{k+1} \underline{Z}_{0k+1} + j\omega \underline{\Phi}_j = 0 \quad (3.2.4)$$

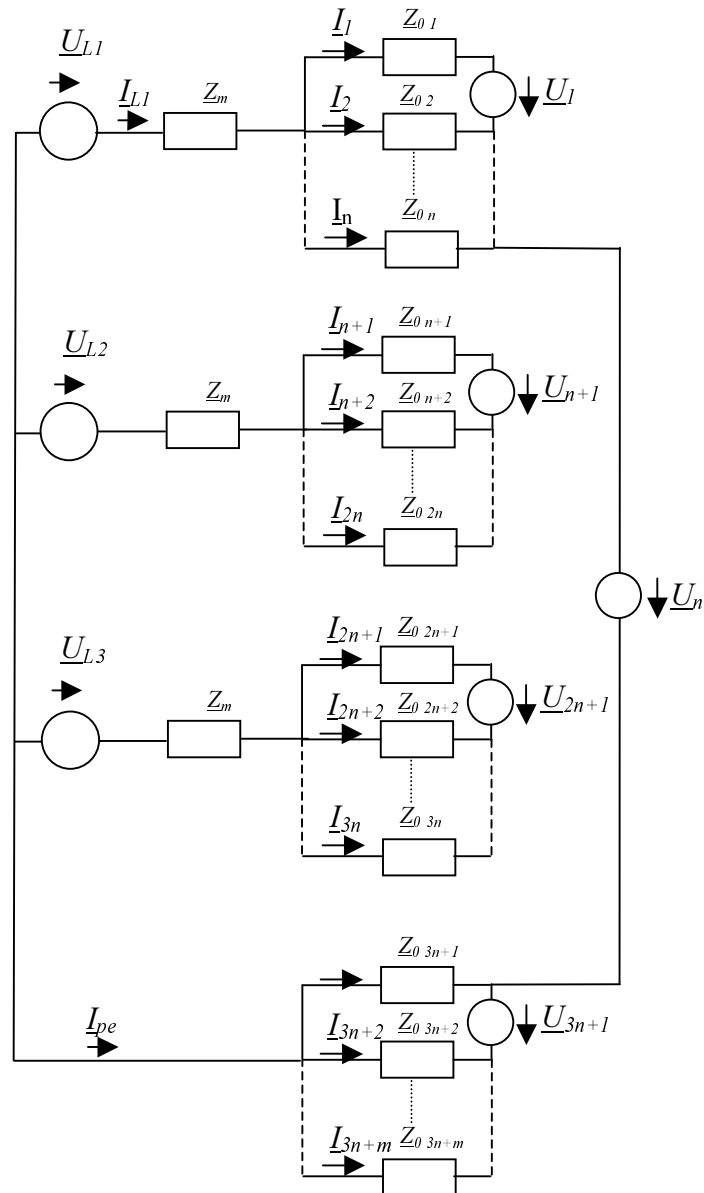
Na sliki 3.2.6 je predstavljeno nadomestno vezje za izračun tokov pri enopolnem kratkem stiku. S predpisi je določeno, da je treba v fazi projektiranja ugotoviti ustreznost zaščite pred posrednim dotikom. Slednja je ustrezna, če je okvarni tok (to je tok enopolnega kratkega stika med faznim in zaščitnim vodnikom) večji od toka, pri katerem zaščitna naprava odklopi v predpisanem času, kar pomeni, da je treba ovrednotiti enopolne kratkostične tokove.

Standard JUS N.B2.741 določa, da okvarna impedanca enopolnega kratkega stika obsega vir, vodnik pod napetostjo do mesta okvare in zaščitni vodnik med mestom okvare in virom. Enopolni kratki stiki se po tem standardu, ki obravnava zaščito pred električnim udarom in je obvezen za uporabo, izračunavajo brez upoštevanja dodatnega izenačenja potencialov nekega stikalnega bloka (npr. vodnika, ki služi za priklop PEN zbiralk na najbližje ozemljene elemente stavbe). Za povratni tokovodnik kratkega stika se zato upošteva samo zaščitno nevtralni vodnik kablovoda.

Fazni in zaščitno nevtralni vodniki kablovoda v splošnem niso simetrično razporejeni, zato impedance kratkostičnih tokokrogov, pri posameznih enopolnih stikih, medsebojno niso enake. Tok kratkega stika, na primer, med vodniki L_1 in PEN ne bo enak toku pri stiku vodnikov L_2 -PEN. Dodatno nesimetrijo impedanc povzroča tudi sama geometrija feromagnetnih nosilcev kablov. Zato se pri kablovodih, ki so izvedeni s snopi tokovodnikov, izračuna najbolj neugoden okvarni tok. Z ozirom na zaščito pred posrednim dotikom je to najmanjši možni kratkostični tok, kontrolo mehanske in termične obremenitve naprav pa se ovrednoti s pomočjo največjega kratkostičnega toka. Katera vrsta kratkega stika da največje oziroma najmanjše tokove, je odvisno od vrste omrežja, elementov omrežja in lokacije okvare. V kolikor nastane kratek stik na dovolj veliki oddaljenosti od transformatorske postaje, so najmanjši tokovi navadno pri enopolnih, največji pa pri tripolnih kratkih stikih. Če je transformatorska postaja v bližini lokacije kratkega stika je lahko, zaradi nične impedance transformatorja, tripolni kratkostični tok celo manjši od enopolnega.

Predpisano okvarno zanko lahko predstavljajo trije enopolni kratki stiki in sicer:

- kratek stik med vodniki prve faze in zaščitno nevtralnimi vodniki (L_1 -PEN),
- kratek stik med vodniki druge faze in zaščitno nevtralnimi vodniki (L_2 -PEN) in
- kratek stik med vodniki tretje faze in zaščitno nevtralnimi vodniki (L_3 -PEN).



Slika 3.2.6 : Nadomestno vezje za izračun porazdelitve tokov pri enopolnem kratkem stiku med vodniki faze L_1 in PEN vodniki

Na sliki 3.2.6 je prikaz nadomestnega vezja, na podlagi katerega so izračunane kratkostične razmere pri stiku vodnikov faze L_1 z zaščitno nevtralnimi vodniki. Nadomestni vezji pri ostalih dveh kratkih stikih (L_2 -PEN in L_3 -PEN) sta podobni vezju na sliki, s to razliko, da je kratkostična vez priključena na snope vodnikov faze L_2 oziroma L_3 .

V enačbah (3.2.2) in (3.2.4) je prisoten magnetni fluks ϕ_j , ki teče skozi zanko z indeksom j . Odvisen je od tokov v posameznih vodnikih, razvrstitve vodnikov, kot tudi od oblike in materiala bližnjih konstrukcijskih delov kablovoda in ostalih sistemov. Navečji vpliv tujih

elementov na magnetni pretok in s tem na impedanco kablovoda, imajo oblika in materiali nosilnih elementov kablovoda, saj se nahajajo v neposredni bližini kablovoda. Ti elementi so najbolj pogosto izvedeni v obliki železnih nosilnih polic oziroma korit. Uporabljajo se tudi police iz umetnega materiala (v glavnem sta to polivinilklorid ali pa polikarbonat), zlasti v agresivnih atmosferah. Zato so bili izračuni izvedeni za obe vrsti materiala nosilnih polic.

3.2.1 Izračun magnetnega pretoka skozi zanko, ki jo tvorita dva ravna, vzporedno priključena vodnika

Vodniki kablovoda, ki so priključeni vzporedno, tvorijo kratkostične zanke. Pri analizi nadomestnih vezij je potrebno v teh zankah upoštevati tudi napetosti, ki se inducirajo zaradi magnetnih polj tokov v vseh posameznih tokovodnikih kablovoda. Skozi vsako zanko kablovoda je zato potrebno določiti magnetni pretok, skladno z geometrijo razvrstitve vodnikov in nadomestnim vezjem, ki je prilagojen reševanju določenih problemov (izračun tokov pri normalni obremenitvi kablovoda, izračun kratkostičnih tokov pri konkretni vrsti kratkega stika; pri tem ločimo tripolni kratek stik in tri vrste enopolnih kratkih stikov).

Izračun prispevka tokovodnika k skupnemu magnetnemu pretoku skozi poljubno zanko se lahko razmeji na dva primera:

- v prvem primeru je tokovodnik, katerega magnetni pretok se določa, del obravnavane zanke (slika 3.2.1.1),
- v drugem primeru tokovodnik, katerega magnetni pretok se določa, ni del obravnavane zanke (slika 3.2.1.2).

Pri izračunu magnetnega pretoka se v splošnem najprej določi diferencial magnetnega pretoka $d\Phi$ za katerega velja izraz (3.2.1.1).

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} \quad (3.2.1.1)$$

Celotni fluks skozi zanko se določi z integracijo enačbe (3.2.1.1) in sicer po ploskvi S , ki je napeta na obravnavano zanko (enačba 3.2.1.2).

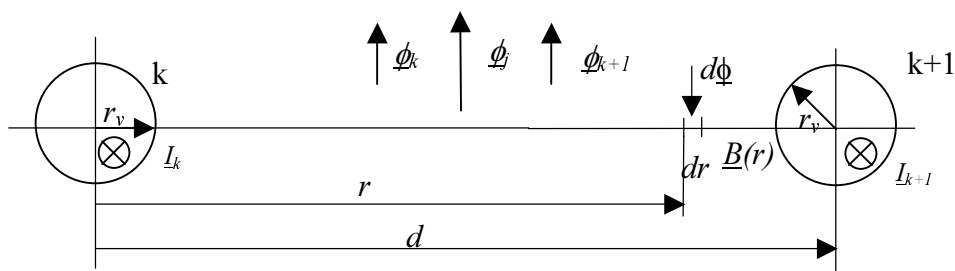
$$\Phi = \iint_A \vec{B} d\vec{S} \quad (3.2.1.2)$$

V primeru ravnih in dolgih tokovodnikov se lahko privzame dvodimenzionalne razmere, kar pomeni, da se gostota magnetnega polja v smeri določenega tokovodnika ne spreminja. V cilindričnem koordinatnem sistemu je gostota polja okroglega vodnika odvisna samo od radija, za smer toka pa je privzeta smer osi z. Matematično se to opiše s sklopom enačb (3.2.1.3).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} &= \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \\ \vec{B} &= 1\vec{\varphi} B_\varphi \\ B_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.2.1.3)$$

S tem se je v izračunih zanemarl vpliv robnega pojava na začetku in koncu kablovoda, kar pa za prakso ni pomembno, saj so dolžine kablovodov neprimerno večje od širine kablovodov.

Slika 3.2.1.1 spada k izračunu magnetnega pretoka v zanki zaradi toka v vodniku z oznako k, ki je hkrati del obravnavane zanke. V tem primeru se integrira samo področje med osjo vodnika k+1 in površino vodnika k, saj je vpliv notranjega magnetnega polja v k-tem vodniku zajet že v notranji impedanci $Z_{o k}$.



Slika 3.2.1.1: K izračunu fluksa skozi zanko z indeksom j

$$\vec{B} = -1\vec{\varphi} \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (3.2.1.4)$$

$$d\vec{S} = -1\vec{\varphi} l dr \quad (3.2.1.5)$$

Doprinos toka I_k k skupnemu magnetnemu pretoku v j-ti zanki, brez upoštevanja polja v k-tem vodniku, je določen z enačbo (3.2.1.6). Pri tem je že upoštevana referenčna smer magnetnega pretoka, ki kaže v smeri ploskve, le ta pa je definirana s smerjo obhoda zanke. Smer obhoda zanke je v enačbah vedno postavljena tako, da poteka v smeri toka vodnika z višjim indeksom in v nasprotni smeri toka vodnika z nižjim indeksom.

$$\underline{\phi}_k = -\frac{I_k \mu l}{2\pi} \int_{r_v}^d \frac{dr}{r} = -\frac{I_k \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.1.6)$$

Na enak način se skozi isto zanko določi magnetni pretok toka vodnika k+1 (enačba 3.2.1.7).

$$\underline{\phi}_{k+1} = \frac{I_{k+1} \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.1.7)$$

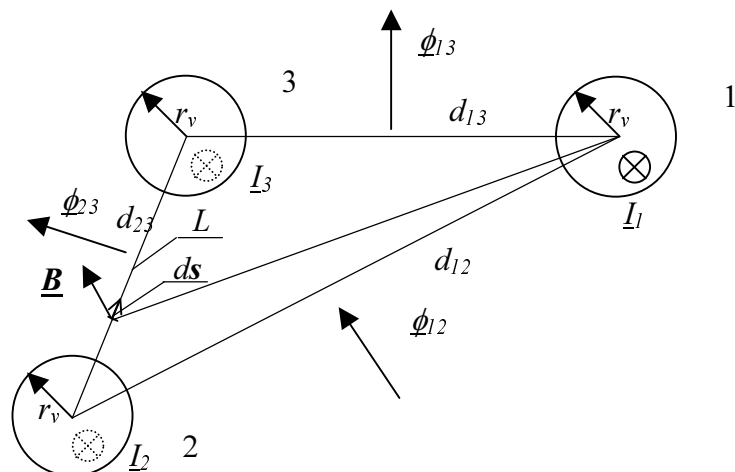
Magnetnim pretokom $\underline{\phi}_k$ in $\underline{\phi}_{k+1}$ pripadata naslednji inducirani napetosti :

$$\underline{U}_k = -j\omega \underline{\phi}_k = I_k \frac{j\omega \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.1.8)$$

$$\underline{U}_{k+1} = -j\omega \underline{\phi}_{k+1} = -I_{k+1} \frac{j\omega \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.1.9)$$

Ti dve napetosti (\underline{U}_k in \underline{U}_{k+1}) predstavljata tisti delež inducirane napetosti v zanki, ki je posledica zunanjih magnetnih polj tokov vodnikov (k in k+1) obravnavane zanke.

Pri določanju inducirane napetosti v zanki je treba upoštevati magnetno polje zaradi tokov v vseh vodnikih kablovoda, torej tudi tistih vodnikov, ki ne sestavljajo obravnavane zanke. Na sliki 3.2.1.2 je predložen splošni primer, ko vodnik ni del zanke v kateri se določa pretok magnetnega polja. Prikazani so trije vodniki z oznakami 1, 2 in 3. Ti vodniki tvorijo zanke 1-2, 2-3 in 1-3. Skozi te zanke tok I_l v vodniku 1 poganja magnetne pretoke $\underline{\phi}_{12}$, $\underline{\phi}_{23}$ in $\underline{\phi}_{13}$. Magnetna pretoka $\underline{\phi}_{12}$ in $\underline{\phi}_{13}$ se lahko določi z enačbo (3.2.1.6).



Slika 3.2.1.2: K izračunu magnetnega pretoka toka vodnika (1), skozi zanko 2-3

Enačba za magnetni pretok ϕ_{23} se lahko izpelje na dva načina. Prvi način je z izračunom linijskega integrala v enačbi 3.2.1.10.

$$\Phi_{23} = \int_L \vec{B} d\vec{s} \quad (3.2.1.10)$$

Ta integral postane za računanje neprijazen. Magnetni pretok ϕ_{23} se lažje določi na podlagi že izračunanih pretokov ϕ_{12} in ϕ_{13} in dejstva, da magnetno polje ni izvorno. Slednje sledi iz druge Maxwellove enačbe (3.2.1.11).

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (3.2.1.11)$$

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = \iint_{S_1} \vec{B} d\vec{S} + \iint_{S_2} \vec{B} d\vec{S} + \iint_{S_{12}} \vec{B} d\vec{S} + \iint_{S_{23}} \vec{B} d\vec{S} + \iint_{S_{13}} \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (3.2.1.12)$$

V ploskovnem integralu (3.2.1.11) nastopa zaključena integracijska ploskev S , ki je sestavljena iz petih ploskev. Ploskvi S_1 in S_2 sta postavljeni na začetek in konec kablovoda ter sta pravokotni na smer toka. Ploskev S_{12} je napeta na zanko 1-2, ploskev S_{13} na zanko 1-3 in ploskev S_{23} na zanko 2-3. Zaradi dvodimenzionalnih razmer je gostota magnetnega polja pravokotna na vektorja ploskev S_1 in S_2 , kar ima za posledico, da je integral (3.2.1.11) po teh dveh ploskvah enak nič. Enačbi (3.2.1.14) in (3.2.1.15) določata fluksa skozi ploskvi S_{12} in S_{13} in ne zajameta magnetnega pretoka znotraj vodnika 1, kar pa nima nobenega vpliva na magnetni pretok skozi zanko 2-3. Zaradi aksialno simetrične razporeditve magnetne gostote toka I_1 , je integral gostote magnetnega polja po tistih odsekih ploskev S_{12} in S_{13} , ki sta znotraj

vodnika 1, ravno tako enak 0. Zato se integral (3.2.1.11) v tem primeru lahko zapiše tudi v obliki, ki jo podaja enačba (3.2.1.13).

$$\underline{\phi}_{13} + \underline{\phi}_{23} - \underline{\phi}_{12} = 0 \quad (3.2.1.13)$$

Magnetna pretoka $\underline{\phi}_{12}$ in $\underline{\phi}_{13}$ sta pretoka skozi zanki, ki ju sestavlja tudi vodnik 1, zato se ta dva fluksa določi na podlagi enačbe (3.2.1.6).

$$\underline{\phi}_{12} = \frac{I_1 \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{12}}{r_v}\right) \quad (3.2.1.14)$$

$$\underline{\phi}_{13} = \frac{I_1 \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{13}}{r_v}\right) \quad (3.2.1.15)$$

Magnetni pretok skozi zanko 2-3 se določi s pomočjo enačb (3.2.1.13), (3.2.1.14) in (3.2.1.15):

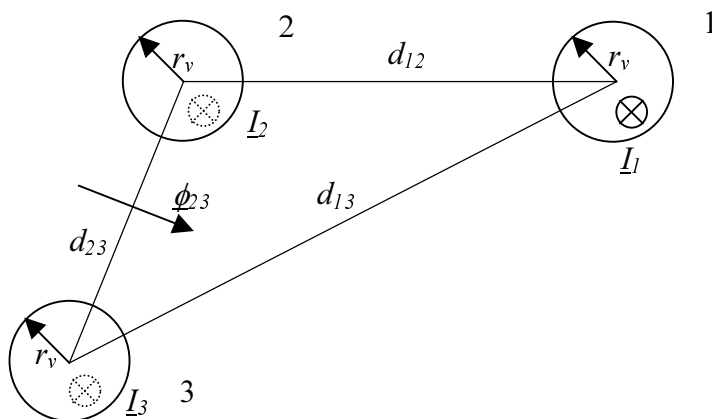
$$\underline{\phi}_{23} = \underline{\phi}_{12} - \underline{\phi}_{13} = \frac{I_1 \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{12}}{d_{13}}\right) \quad (3.2.1.16)$$

Fluks v zanki 2-3 inducira napetost, ki je določena z enačbo (3.2.1.17).

$$\underline{U}_{23,1} = -j\omega \underline{\phi}_{23,1} = -I_1 \frac{j\omega \mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{12}}{d_{13}}\right) \quad (3.2.1.17)$$

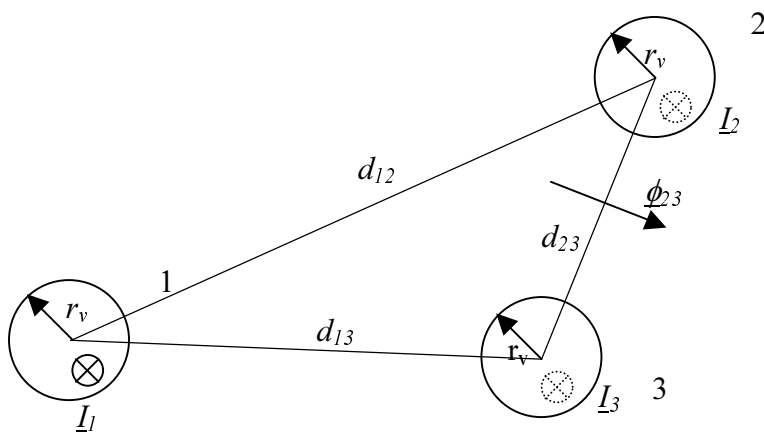
V primeru, ki je na sliki 3.2.1.2 je bilo privzeto pravilo, da smer fluksa $\underline{\phi}_{23}$ kaže v smer ploskve, ki je napeta na zanko 2-3. Smer obhoda zanke je v smeri toka vodnika z višjim indeksom (3) in v nasprotni smeri toka z manjšim indeksom (2). Predpostavljena smer fluksa v tem primeru sovпада z dejansko smerjo fluksa $\underline{\phi}_{23}$. Ker je razdalja d_{12} večja od razdalje d_{13} , bo tudi logaritem v enačbi za fluks $\underline{\phi}_{23}$ (3.2.1.16) zavzel pozitivno vrednost. To pomeni, da je dejanska smer fluksa $\underline{\phi}_{23}$ enaka referenčni smeri. Pri tem se opaža, da je v imenovalcu enačbe 3.2.1.16 razdalja do vodnika z višjim indeksom d_{13} v števcu pa razdalja z nižjim indeksom d_{12} . Če se indekse vodnikov 2 in 3 med sabo zamenja (slika 3.2.1.3), je treba spremeniti

predpostavljeno oziroma referenčno smer fluksa, saj naj bi obhod zanke potekal v smeri toka v vodniku z višjim indeksom. V tem primeru je dejanska smer fluksa ϕ_{23} v nasprotni smeri od referenčne, razdalja d_{12} pa je manjša od razdalje d_{13} . Zato ima logaritem v enačbi 3.2.1.16 negativno vrednost.



Slika 3.2.1.3: Referenčna smer fluksa ϕ_{23} pri medsebojni zamenjavi indeksov vodnikov 2 in 3

V kolikor se vodnik 1 postavi levo od vodnikov 2 in 3, kot kaže slika 3.2.1.4, postane razdalja d_{12} večja od razdalje d_{13} . Dejanski fluks takrat teče v referenčno smer, logaritem v enačbi 3.2.1.16 pa skladno s tem poda pozitivno vrednost.

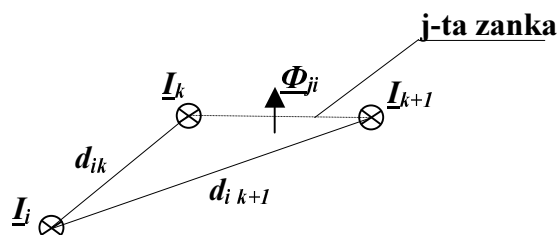


Slika 3.2.1.4: Referenčna smer fluksa ϕ_{23} pri prestavitvi vodnika 1 levo od vodnikov 2 in 3

Iz tega je že razvidno pravilo, da v kolikor poteka zanka v smeri toka vodnika z višjim indeksom, mora biti v imenovalcu vedno razdalja do vodnika z višjim indeksom. S tem je inducirana napetost v zanki, pri poljubni razvrstitvi in indeksiranju vodnikov, že pravilno vključena v zanko enačbo 3.2.4, oziroma predznak inducirane napetosti v tej enačbi bo pravičen.

3.2.2 Pravila, ki so bila upoštevana pri določanju magnetnih pretokov v zankah

Napetostna enačba j-te zanke je bila določena za pozitivne smeri toka, ki tečejo v risalno ploskev. Pri tem je bila smer fluksa $\underline{\Phi}$ enaka smeri ploskve, ki je napeta na j-to zanko. Na sliki 3.2.2.1 je predstavljen splošen primer, ko vodnik, po katerem teče tok \underline{I}_j , ni del j-te zanke in povzroča v tej zanki magnetni pretok $\underline{\Phi}_{ji}$.



Slika 3.2.2.1: Prikaz geometrije vodnikov in referenčne smeri tokov in fluksa za primer, ko tok, katerega fluks se določa, ni del zanke

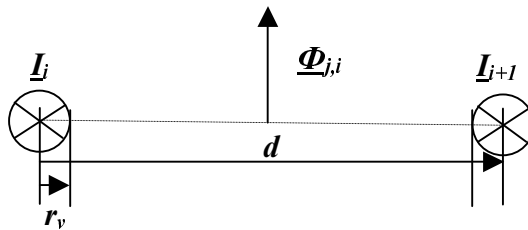
Z enačbo (3.2.2.1) se v zančni enačbi j-te zanke upošteva prispevek i-tega toka k skupnemu magnetnemu pretoku v tej zanki. Enačba (3.2.2.1) velja za primer, ko tok \underline{I}_j ne teče po zanki v kateri se izračunava magnetni pretok.

$$\underline{\Phi}_{ji} = \underline{I}_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{ik}}{d_{i_{k+1}}}\right) \quad (3.2.2.1)$$

V kolikor je i-ti vodnik del zanke z oznako j, se razlikuje dva primera za določanje doprinosa tega toka k skupnemu fluksu zanke:

- Če ima vodnik, katerega tok \underline{I}_i povzroča magnetni pretok, manjši indeks od drugega vodnika, se magnetni pretok v zančnih enačbah določi z enačbo (3.2.2.2), kar temelji na dogovoru o smeri obhoda zanke.

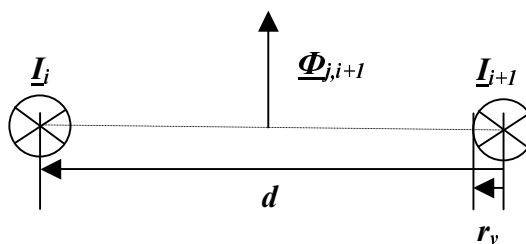
$$\underline{\Phi}_{j,i} = -\underline{I}_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.2.2)$$



Slika 3.2.2.2: Prikaz geometrije vodnikov in referenčne smeri fluksa za primer, ko je tok, katerega fluks se določa, z manjšim indeksom

- V naprotnem primeru, ko ima vodnik, katerega tok I_{i+1} povzroča magnetni pretok, večji indeks od drugega vodnika v zanki, se magnetni pretok v zančnih enačbah določi z enačbo (3.2.2.3).

$$\underline{\Phi}_{j,i+1} = I_{i+1} \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{r_v}\right) \quad (3.2.2.3)$$



Slika 3.2.2.3: Prikaz geometrije vodnikov in referenčne smeri fluksa za primer, ko je tok, katerega fluks se določa, z večjim indeksom

V teh dveh primerih se upošteva samo magnetni pretok, ki se razpreda v področju od polmera r_v vodnika, katerega tok povzroča ta magnetni pretok, do osi sosednjega vodnika.

V vsakem faznem snopu je n vodnikov, v snopu zaščitno nevtralnih vodnikov pa m vodnikov.

Indeksi vodnikov v:

- fazi L_1 tečejo od vrednosti 1 do vrednosti n ,
- fazi L_2 tečejo od vrednosti $n+1$ do vrednosti $2n$,
- fazi L_3 tečejo od vrednosti $2n+1$ do vrednosti $3n$,
- snopu zaščitno nevtralnih vodnikov pa od vrednosti $3n+1$ do $3n+m$.

Določeno zanko sestavljata po dva vodnika z zaporednima oznakama, splošno sta to k in $k+1$.

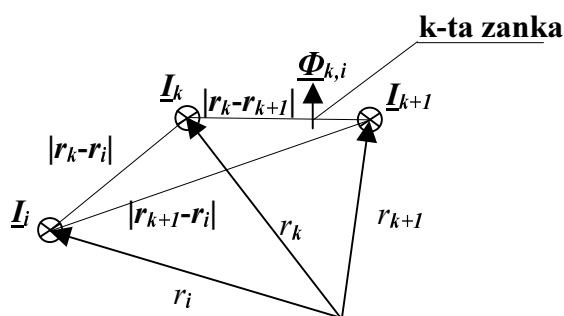
Zanka je označena z manjšim indeksom (k) vodnika, ki je sestavni del zanke.

Skupni magnetni pretok skozi k-to zanko se, z ozirom na predhodne enačbe, določi z izrazom (3.2.2.4). V tej enačbi indeks i pripada i -temu vodniku, indeks k pa označuje zanko v kateri se določa magnetni pretok. Vektorja \mathbf{r}_k in \mathbf{r}_{k+1} sta krajevna vektorja vodnikov, ki sestavljata zanko. Vektor \mathbf{r}_i je krajevni vektor i -tega vodnika, ki ni del zanke in katerega tok tudi doprinaša k skupnemu magnetnemu pretoku ϕ_k .

$$\begin{aligned} \phi_k = & \sum_{i=1}^{k-1} I_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_i|}{|\vec{r}_{k+1} - \vec{r}_i|}\right) - I_k \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_{k+1}|}{r_v}\right) + \\ & + I_{k+1} \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_{k+1}|}{r_v}\right) + \sum_{i=k+2}^{3n+m} I_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_i|}{|\vec{r}_{k+1} - \vec{r}_i|}\right) \end{aligned} \quad (3.2.2.4)$$

Prvi in zadnji člen enačbe (3.2.2.4) sta vsoti magnetnih pretokov tokov, ki ne pripadajo k -ti zanki. Vsota drugega in tretjega sumanda predstavlja magnetni pretok zaradi tokov (I_k, I_{k+1}) v obeh vodnikih, ki sestavljata k -to zanko.

Pomen veličin v enačbi (3.2.2.4) je prikazan na sliki 3.2.2.4.



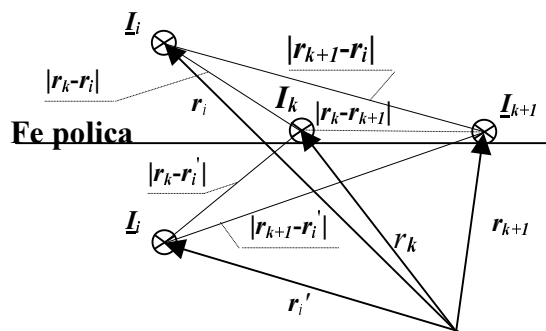
Slika 3.2.2.4: Prikaz geometrije vodnikov, krajevnih vektorjev in referenčne smeri fluksa v zanki j , ki nastane zaradi toka v vodniku i

V kolikor so vodniki položeni na kabelske police iz feromagnetnega materiala, se vpliv police lahko nadomesti z zrcaljenjem vodnikov preko notranje površine kabelske police. Pri tem ločimo popolno in nepopolno zrcaljenje. Popolno zrcaljenje se uporablja pri feromagnetikih z neskončno magnetno permeabilnostjo. To pomeni, da magnetne silnice vstopajo pravokotno na površino kabelske police, kar se doseže tako, da se dejanski vpliv feromagnetika nadomesti z namišljenimi tokovi, ki so nameščeni zrcalno na nasprotno stran površine feromagnetika (slika 3.2.2.5). Pri tem so namišljeni tokovi enaki zrcaljenim tokovom. Najbolj pogosto so kabelske police izvedene iz jeklene pločevine, ki nima neskončne permeabilnosti. V takih

primerih bi bilo, strogo gledano, treba uporabiti nepopolno zrcaljenje, pri katerem se zrcalne tokove pomnoži s faktorjem β (enačba 3.2.2.5).

$$\beta = \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} = \frac{\frac{\mu}{\mu_0} - 1}{\frac{\mu}{\mu_0} + 1} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \quad (3.2.2.5)$$

Ker imajo realni feromagnetiki relativno permeabilnost mnogo večjo od 1, je faktor β približno enak vrednosti 1. V izračunih za prakso se zato uporablja kar popolno zrcaljenje.



Slika 3.2.2.5: Zrcaljenje vodnikov preko ravnine, ki predstavlja površino feromagnetne kabelske police

Zaradi zrcaljenja je treba v enačbo (3.2.2.4) dodati še prispevek magnetnih pretokov zrcalnih tokov, ki ga predstavlja zadnji sumand v enačbi (3.2.2.6). Pretoki zrcalnih tokov so v tej enačbi podani enostavno samo z enim členom zaradi tega, ker noben od zrcalnih vodnikov ni sestavni del obravnavane zanke.

$$\begin{aligned} \underline{\phi}_k = & \sum_{i=1}^{k-1} I_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_i|}{|\vec{r}_{k+1} - \vec{r}_i|} \right) - I_k \frac{l\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_{k+1}|}{r_v} \right) + \\ & + I_{k+1} \frac{l\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_{k+1}|}{r_v} \right) + \sum_{i=k+2}^{3n+m} I_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_i|}{|\vec{r}_{k+1} - \vec{r}_i|} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^{3n+m} I_i \frac{l\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_i'|}{|\vec{r}_{k+1} - \vec{r}_i'|} \right) \end{aligned} \quad (3.2.2.6)$$

3.2.3 Sistem enačb za analizo nadomestnega vezja

Izračuni tokov v posameznih vodnikih, ter izračuni ostalih veličin, so bili izvedeni s pomočjo analize nadomestnih vezij, ki so predstavljeni na slikah 3.2.1, 3.2.4 in 3.2.6. Posamezno nadomestno vezje se opiše s sistemom kompleksnih linearnih enačb, ki se delijo na:

- tokovne vozliščne enačbe in
- napetostne zanke enačbe.

Tokovne vozliščne enačbe izhajajo iz dejstva, da je vsota vseh pritekajočih in odtekajočih tokov v neko vozlišče enako nič. Pri nadomestnih vezjih, v katerih je breme nadomeščeno s tokovnimi generatorji, so vsote tokov v vseh štirih snopih vodnikov znane. Tokovne enačbe so štiri, saj gre za tri snope faznih vodnikov in en snop zaščitno nevtralnih vodnikov v trifazno simetričnem obremenjenem kablovodu (sklop enačb 3.2.3.1).

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= \sum_{i=1}^n \underline{I}_i = I_o e^{j\varphi_z} \\ \underline{I}_{L2} &= \sum_{i=n+1}^{2n} \underline{I}_i = I_o e^{j\left(\frac{2\pi}{3} + \varphi_z\right)} \\ \underline{I}_{L3} &= \sum_{i=2n+1}^{3n} \underline{I}_i = I_o e^{j\left(\frac{4\pi}{3} + \varphi_z\right)} \\ \underline{I}_{PE} &= \sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i = 0\end{aligned}\tag{3.2.3.1}$$

V sklopu enačb (3.2.3.1) je I_o nek poljuben oziroma predpostavljen absolutni tok trifaznega bremena, n število vodnikov v posameznem faznem snopu in m število vodnikov v snopu zaščitno nevtralnih vodnikov.

Ker gre za simetrično obremenitev, ni pomembno ali so zaščitno nevtralni vodniki priklopljeni na morebitno zvezdišče bremena, zato je celotni tok zaščitno nevtralnih vodnikov enak 0, kar je določeno s četrto tokovno enačbo.

Napetostne enačbe upoštevajo drugi Kirchoffov zakon, ki pravi, da je vsota vseh napetosti v zanki vedno enaka nič. Pri opisu nadomestnega vezja s tokovnimi generatorji je teh enačb $3(n-1)+m-1$, ki se jih definira na podlagi enačbe (3.2.2). Dobi se $3n+m-4$ napetostnih in 4 tokovne enačbe, skupaj torej $3n+m$ enačb. Enačb je toliko, kolikor je neznanih tokov oziroma vodnikov, kar je pogoj za enolično rešljivost sistema.

V nadomestnih vezjih (sliki 3.2.4, 3.2.6), ki so podlaga za določanje kratkostičnih veličin, so vsi tokovi neznani, znane pa so omrežne napetosti \underline{U}_{L1} , \underline{U}_{L2} in \underline{U}_{L3} . Prva možnost, ki je bila uporabljena v programu je, da se v napetostnih enačbah skupni fazni tokovi izrazijo kot vsote tokov, ki pripadajo določenemu faznemu snopu vodnikov, tako kot je to napravljeno v enačbi 3.2.4. Druga možnost pa je, da se skupni tok snopa vodnikov obravnava kot novo neznanko. S tem se sistem enačb pri analizi tripolnega kratkega stika razširi še za tri enačbe.

V sistemu enačb za izračun tripolnega kratkega stika se dve enačbi porabi za opis zank v katerih so generatorji, ki predstavljajo omrežno napetost. Prva zanka poveže snope vodnikov faz L_1 in L_2 , druga pa snope vodnikov L_2 in L_3 (enačbi 3.2.3.2 in 3.2.3.3).

$$-\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} - \underline{Z}_m \sum_{j=1}^n \underline{I}_j + \underline{Z}_m \sum_{j=n+1}^{2n} \underline{I}_j - \underline{I}_n \underline{Z}_{on} + \underline{I}_{n+1} \underline{Z}_{on+1} + j\omega \underline{\Phi}_n = 0 \quad (3.2.3.2)$$

$$-\underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} - \underline{Z}_m \sum_{j=n+1}^{2n} \underline{I}_j + \underline{Z}_m \sum_{j=2n+1}^{3n} \underline{I}_j - \underline{I}_{2n} \underline{Z}_{o2n} + \underline{I}_{2n+1} \underline{Z}_{o2n+1} + j\omega \underline{\Phi}_{2n} = 0 \quad (3.2.3.3)$$

Predpostavljeno je, da so vse dodatne impedance \underline{Z}_m v vseh treh fazah enake, torej da gre za simetrični sistem. Magnetna pretoka $\underline{\phi}_n$ in $\underline{\phi}_{2n}$ sta definirana z enačbo (3.2.2.6).

Obstaja pa še $3(n-1)+(m-1)$ zank, ki so znotraj snopa vodnikov in imajo kot take samo napetostne generatorje, ki nadomeščajo inducirane napetosti. Za j -to zanko velja enačba (3.2.3.4).

$$-\underline{I}_j \underline{Z}_{oj} + \underline{I}_{j+1} \underline{Z}_{oj+1} + j\omega \underline{\Phi}_j = 0 \quad (3.2.3.4)$$

V točki tripolnega kratkega stika je vsota vseh tokov enaka nič. To velja posebej za vse fazne vodnike in posebej za zaščitno nevtralne vodnike, za katere je predpostavljeno, da niso galvansko povezani s faznimi vodniki. Slednje je definirano z enačbama (3.2.3.5) in (3.2.3.6).

$$\sum_{i=1}^{3n} \underline{I}_i = 0 \quad (3.2.3.5)$$

$$\sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i = 0 \quad (3.2.3.6)$$

V sistemu je tako $3n+m-2$ napetostnih enačb in dve tokovni enačbi. Vseh enačb je ravno toliko, kolikor je neznanih tokov ($3n+m$) oziroma vodnikov.

Pri izračunu enopolnih kratkih stikov je v sistemu samo ena enačba v katero je vključena tudi omrežna napetost. Ta enačba opisuje zanko, ki jo lahko sestavljajo zadnji vodnik v snopu faznih vodnikov, prvi vodnik snopa zaščitno nevtralnih vodnikov, omrežna napetost in dodatna (omrežna) impedanca. Kratek stik med vodniki prve faze (L_1) in zaščitno nevtralnimi vodniki opisuje enačba (3.2.3.7).

$$-\underline{U}_{L1} - \underline{Z}_m \sum_{j=1}^n \underline{I}_j + \underline{Z}_m \sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i - \underline{I}_n \underline{Z}_{on} + \underline{I}_{3n+1} \underline{Z}_{on+1} + j\omega \underline{\Phi}_n = 0 \quad (3.2.3.7)$$

Enačbe zank v snopih vodnikov ostanejo enake (enačba 3.2.3.4), spremenijo pa se tokovne enačbe. Za analizo tripolnega kratkega stika zadostujeta dve tokovni enačbi, pri enopolnem stiku pa se pojavijo tri. Prva tokovna enačba definira katera faza je v kratkem stiku. Vsota vseh tokov v snopu vodnikov okvarjene faze (na primer L_1) in v snopu zaščitno nevtralnih vodnikov mora biti enaka nič (enačba 3.2.3.8).

$$\underline{I}_{PE} = -\underline{I}_{L1} \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_{L1} + \underline{I}_{PE} = 0 \quad \sum_{i=1}^n \underline{I}_i + \sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i = 0 \quad (3.2.3.8)$$

Snopi vodnikov zdravih faz (L_2 in L_3) pri enopolnem stiku niso galvansko povezani z vodniki kratkostičnega tokokroga. Zato se prvi Kirchoffov zakon zapiše posebej za vsak zdravi snop vodnikov, kar je podano z enačbama (3.2.3.9) in (3.2.3.10).

$$\underline{I}_{L2} = \sum_{i=n+1}^{2n} \underline{I}_i = 0 \quad (3.2.3.9)$$

$$\underline{I}_{L3} = \sum_{i=2n+1}^{3n} \underline{I}_i = 0 \quad (3.2.3.10)$$

Slednji sistem je sestavljen iz treh tokovnih enačb (3.2.3.8, 3.2.3.9, 3.2.3.10) in $3(n-1)+(m-1)+1$ napetostnih, kar skupaj zneso $3n+m$ enačb, torej ravno toliko kot je neznanih tokov.

Podobne sisteme se lahko zapiše, če so zaščitno nevtralnimi vodniki v stiku z vodniki faze L_2 oziroma faze L_3 . Pri tem se ustrezno prilagodijo indeksi v enačbi (3.2.3.7), napetostne enačbe zank znotraj snopov vodnikov (enačba 3.2.3.4) pa ostanejo nespremenjene. Tokovne enačbe

se prilagodijo tako, da je vsota toka okvarjene faze in toka v zaščitno nevtralnih vodnikih enaka nič, za vsak snop vodnikov zdravih faz pa tudi velja prvi Kirchoffov zakon.

Nadomestnemu vezju, ki obravnava normalno obremenitev kablovoda (slika 3.2.1), ustrezajo napetostne enačbe (3.2.3.4.1-3.2.3.4.8). V teh enačbah nastopajo razdalje d_{xy} med pari vodnikov, kjer ima prvi vodnik indeks x, drugi vodnik pa indeks y. Oznaka N določa število vseh vodnikov v kablovodu (3.2.3.11).

$$N=3n+m \quad (3.2.3.11)$$

Za vsak snop vodnikov sta na tem mestu, zaradi obsežnosti enačb, detajlno definirani samo prvi dve enačbi, iz katerih je razviden sistem tvorbe napetostnih enačb za ostale zanke v snopu.

Pri izračunu tripolnega kratkega stika, se napetostnim enačbam (3.2.3.4.1-3.2.3.4.8) pridružita še dve dodatni napetostni enačbi (3.2.3.4.9 in 3.2.3.4.10), pri enopolnem kratkem stiku pa samo ena dodatna napetostna enačba (3.2.3.4.11). Dodatni enačbi opisujeta napetostno ravnotežje med snopi vodnikov, ki pripadajo različnim fazam. Pri enopolnem stiku dodatna enačba določa, kateri snop faznih vodnikov je v stiku s snopom zaščitno nevtralnih vodnikov. Razdalje d_{xy} so razdalje med vodnikoma x in y, razdalje d'_{xy} pa so razdalje med vodnikoma x in zrcalno sliko vodnika y preko feromagnetne podlage.

V teh enačbah je faktor \underline{k}_f , ki je določen z enačbo (3.2.3.12).

$$\underline{k}_f = j\omega \frac{\mu l}{2\pi} \quad (3.2.3.12)$$

3.2.3.4 *Napetostne enačbe zank znotraj snopa vodnikov*

- *Napetostne enačbe zank v snopu vodnikov faze L_1*

Prva zanka v snopu vodnikov faze L_1 je sestavljena iz vodnikov 1 in 2:

$$0 = \underline{I}_1 \left(-\underline{Z}_{o1} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{12} d'_{12}}{r_v d'_{11}} \right) \right) + \underline{I}_2 \left(\underline{Z}_{o2} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{12} d'_{12}}{r_v d'_{22}} \right) \right) + \underline{I}_3 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{13} d'_{13}}{d_{23} d'_{23}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{1N} d'_{1N}}{d_{2N} d'_{2N}} \right) \quad (3.2.3.4.1)$$

Drugo zanko v snopu vodnikov faze L_1 sestavljata vodnika 2 in 3:

$$0 = \underline{I}_1 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{21} d'_{21}}{d_{31} d'_{31}} \right) + \underline{I}_2 \left(-\underline{Z}_{o2} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{32} d'_{32}}{r_v d'_{22}} \right) \right) + \underline{I}_3 \left(\underline{Z}_{o2} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{23} d'_{23}}{r_v d'_{33}} \right) \right) + \quad (3.2.3.4.2)$$

$$+ \underline{I}_4 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{24} d'_{24}}{d_{34} d'_{34}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{2N} d'_{2N}}{d_{3N} d'_{3N}} \right)$$

Na isti način se za snop vodnikov faze L_1 definira še preostalih $(n-3)$ zank.

- *Napetostne enačbe zank v snopu vodnikov faze L_2*

Prva zanka v snopu vodnikov faze L_2 je sestavljena iz para vodnikov z oznakama $(n+1)$ in $(n+2)$:

$$0 = \underline{I}_1 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+1)1} d'_{(n+1)1}}{d_{(n+2)1} d'_{(n+2)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{n+1} \left(-\underline{Z}_{o(n+1)} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+2)(n+1)} d'_{(n+2)(n+1)}}{r_v d'_{(n+1)(n+1)}} \right) \right) + \quad (3.2.3.4.3)$$

$$\underline{I}_{n+2} \left(\underline{Z}_{o(n+2)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+1)(n+2)} d'_{(n+1)(n+2)}}{r_v d'_{(n+2)(n+2)}} \right) \right) + \underline{I}_{n+3} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+1)(n+3)} d'_{(n+1)(n+3)}}{d_{(n+2)(n+3)} d'_{(n+2)(n+3)}} \right) +$$

$$+ \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+1)N} d'_{(n+1)N}}{d_{(n+2)N} d'_{(n+2)N}} \right)$$

Druga zanka pa je sestavljena iz para vodnikov z oznakama $(n+2)$ in $(n+3)$:

$$0 = \underline{I}_1 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+2)1} d'_{(n+2)1}}{d_{(n+3)1} d'_{(n+3)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{n+2} \left(-\underline{Z}_{o(n+2)} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+3)(n+2)} d'_{(n+3)(n+2)}}{r_v d'_{(n+2)(n+2)}} \right) \right) + \quad (3.2.3.4.4)$$

$$+ \underline{I}_{n+3} \left(\underline{Z}_{o(n+3)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+2)(n+3)} d'_{(n+2)(n+3)}}{r_v d'_{(n+3)(n+3)}} \right) \right) + \underline{I}_{n+4} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+2)(n+4)} d'_{(n+2)(n+4)}}{d_{(n+3)(n+4)} d'_{(n+3)(n+4)}} \right) +$$

$$+ \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+2)N} d'_{(n+2)N}}{d_{(n+3)N} d'_{(n+3)N}} \right)$$

- *Napetostne enačbe zank v snopu vodnikov faze L₃*

Prva zanka v snopu vodnikov faze L₃ je sestavljena iz para vodnikov z oznakama (2n+1) in (2n+2):

$$\begin{aligned}
& \underline{I}_1 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+1)1} d'_{(2n+1)1}}{d_{(2n+2)1} d'_{(2n+2)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{2n+1} \left(-\underline{Z}_{o(2n+1)} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+2)(2n+1)} d'_{(2n+2)(2n+1)}}{r_v d'_{(2n+1)(2n+1)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{2n+2} \left(\underline{Z}_{o(2n+2)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+1)(2n+2)} d'_{(2n+1)(2n+2)}}{r_v d'_{(2n+2)(2n+2)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{2n+3} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+1)(2n+3)} d'_{(2n+1)(2n+3)}}{d_{(2n+2)(2n+3)} d'_{(2n+2)(2n+3)}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+1)N} d'_{(2n+1)N}}{d_{(2n+2)N} d'_{(2n+2)N}} \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.5}$$

Drugo zanko sestavljata vodnika z indeksoma (2n+2) in (2n+3):

$$\begin{aligned}
0 = & \underline{I}_1 \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+2)1} d'_{(2n+2)1}}{d_{(2n+3)1} d'_{(2n+3)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{2n+2} \left(-\underline{Z}_{o(2n+2)} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+3)(2n+2)} d'_{(2n+3)(2n+2)}}{r_v d'_{(2n+2)(2n+2)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{2n+3} \left(\underline{Z}_{o(2n+3)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+2)(2n+3)} d'_{(2n+2)(2n+3)}}{r_v d'_{(2n+3)(2n+3)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{2n+4} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+2)(2n+4)} d'_{(2n+2)(2n+4)}}{d_{(2n+3)(2n+4)} d'_{(2n+3)(2n+4)}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+2)N} d'_{(2n+2)N}}{d_{(2n+3)N} d'_{(2n+3)N}} \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.6}$$

- *Napetostne enačbe zank v snopu nevtralnno zaščitnih vodnikov*

Ker je v kablovodu m nevtralnno zaščitnih vodnikov, le ti sestavljajo (m-1) zank in s tem tudi toliko napetostnih enačb. V splošnem pri močnejših kablovodih ni nujno, da je število zaščitno nevtralnno vodnikov enako številu vodnikov v posameznem snopu faznih vodnikov. Predpisi zahtevajo, da je skupni presek zaščitnih vodnikov vsaj polovica skupnega preseka vseh vodnikov, ki pripadajo snopu faznih vodnikov. Pogoji pri tem je, da so vsi vodniki iz enakega prevodnika in da je skupni presek faznih bakrenih vodnikov večji ali enak 35 mm².

V obravnavanem snopu (3n+1)-ti in (3n+2)-ti vodnik sestavljata prvo zanko s pripadajočo napetostno enačbo:

$$\begin{aligned}
0 = & \underline{I}_1 \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+1)1} d'_{(3n+1)1}}{d_{(3n+2)1} d'_{(3n+2)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{3n+1} \left(-\underline{Z}_{o(3n+1)} - \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+2)(3n+1)} d'_{(3n+2)(3n+1)}}{r_v d'_{(3n+1)(3n+1)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{3n+2} \left(\underline{Z}_{o(3n+2)} + \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+1)(3n+2)} d'_{(3n+1)(3n+2)}}{r_v d'_{(3n+2)(3n+2)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{3n+3} \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+1)(3n+3)} d'_{(3n+1)(3n+3)}}{d_{(3n+2)(3n+3)} d'_{(3n+2)(3n+3)}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+1)N} d'_{(3n+1)N}}{d_{(3n+2)N} d'_{(3n+2)N}} \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.7}$$

Druga zanka v zaščitnem snopu vodnikov zaobsega par vodnikov z oznakama (3n+2) in (3n+3). Napetostna enačba za to zanko se zapiše takole:

$$\begin{aligned}
0 = & \underline{I}_1 \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+2)1} d'_{(3n+2)1}}{d_{(3n+3)1} d'_{(3n+3)1}} \right) + \dots + \underline{I}_{3n+2} \left(-\underline{Z}_{o(3n+2)} - \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+3)(3n+2)} d'_{(3n+3)(3n+2)}}{r_v d'_{(3n+2)(3n+2)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{3n+3} \left(\underline{Z}_{o(3n+3)} + \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+2)(3n+3)} d'_{(3n+2)(3n+3)}}{r_v d'_{(3n+3)(3n+3)}} \right) \right) + \\
& + \underline{I}_{3n+4} \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+2)(3n+4)} d'_{(3n+2)(3n+4)}}{d_{(3n+3)(3n+4)} d'_{(3n+3)(3n+4)}} \right) + \dots + \underline{I}_N \underline{k} \ln \left(\frac{d_{(3n+2)N} d'_{(3n+2)N}}{d_{(3n+3)N} d'_{(3n+3)N}} \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.8}$$

- *Dodatni napetostni enačbi pri izračunu tripolnega kratkega stika*

Med sosednjima snopoma faznih vodnikov so priključeni napetostni generatorji, ki skozi kablovod poženejo kratkostične tokove. Skladno s teorijo vezij se pri tem lahko poljubno izbere vrstni red faz in vodnikov znotraj določenega snopa. Na tem mestu so bile izbrane zanke med fazami L₁ in L₂ ter med L₂ in L₃. V enačbo so bili vključeni zadnji vodnik snopa prve faze in prvi vodnik snopa druge faze. To so vodniki z indeksi n, n+1, 2n in 2n+1.

Enačba (3.2.3.4.9) opisuje napetostno ravnotežje v dodatni zanki L₁-L₂, katero sestavljajo generatorji omrežne napetosti, dodatna impedanca in vodnika n ter n+1.

$$\begin{aligned}
-\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} = & \underline{I}_1 \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n1} d'_{n1}}{d_{(n+1)1} d'_{(n+1)1}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_{n-1} \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n(n-1)} d'_{n(n-1)}}{d_{(n+1)(n-1)} d'_{(n+1)(n-1)}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \\
& \underline{I}_n \left(-\underline{Z}_{on} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n+1)n} d'_{(n+1)n}}{r_v d'_{nn}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \underline{I}_{n+1} \left(\underline{Z}_{o(n+1)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n)(n+1)} d'_{(n)(n+1)}}{r_v d'_{(n+1)(n+1)}} \right) + \underline{Z}_m \right) \\
& + \underline{I}_{n+2} \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n)(n+2)} d'_{(n)(n+2)}}{d_{(n+1)(n+2)} d'_{(n+1)(n+2)}} \right) + \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_N \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n)N} d'_{(n)N}}{d_{(n+1)N} d'_{(n+1)N}} \right) + \underline{Z}_m \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.9}$$

Napetostna enačba (3.2.3.4.10) na podoben način opisuje razmere v dodatni zanki L₂-L₃, v katero sta vključena vodnika z oznakama 2n in 2n+1 .

$$\begin{aligned}
-\underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} = & \underline{I}_1 \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{2n1} d'_{2n1}}{d_{(2n+1)1} d'_{(2n+1)1}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_{2n-1} \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{2n(2n-1)} d'_{2n(2n-1)}}{d_{(2n+1)(2n-1)} d'_{(2n+1)(2n-1)}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \\
& \underline{I}_{2n} \left(-\underline{Z}_{o2n} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n+1)2n} d'_{(2n+1)2n}}{r_v d'_{2n2n}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \underline{I}_{2n+1} \left(\underline{Z}_{o(2n+1)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n)(2n+1)} d'_{(2n)(2n+1)}}{r_v d'_{(2n+1)(2n+1)}} \right) + \underline{Z}_m \right) + \\
& + \underline{I}_{2n+2} \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n)(2n+2)} d'_{(2n)(2n+2)}}{d_{(2n+1)(2n+2)} d'_{(2n+1)(2n+2)}} \right) + \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_N \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(2n)N} d'_{(2n)N}}{d_{(2n+1)N} d'_{(2n+1)N}} \right) + \underline{Z}_m \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.10}$$

Pri enopolnem kratkem stiku se namesto prejšnjih dveh enačb upošteva samo eno enačbo, ki definira stik snopa faznih vodnikov s snopom zaščitno nevtralnih vodnikov. Na tem mestu je navedena enačba (3.2.3.4.11), ki povezuje vodnike faze L₁ z zaščitno nevtralnimi vodniki.

$$\begin{aligned}
-\underline{U}_{L1} = & \underline{I}_1 \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n1} d'_{n1}}{d_{(3n+1)1} d'_{(3n+1)1}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_{n-1} \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n(n-1)} d'_{n(n-1)}}{d_{(3n+1)(n-1)} d'_{(3n+1)(n-1)}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \\
& + \underline{I}_n \left(-\underline{Z}_{on} - \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(3n+1)n} d'_{(3n+1)n}}{r_v d'_{nn}} \right) - \underline{Z}_m \right) + \underline{I}_{n+1} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n(n+1)} d'_{n(n+1)}}{d_{(3n+1)(n+1)} d'_{(3n+1)(n+1)}} \right) + \\
& + \underline{I}_{n+2} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n(n+2)} d'_{n(n+2)}}{d_{(3n+1)(n+2)} d'_{(3n+1)(n+2)}} \right) + \dots + \underline{I}_{3n} \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{n(3n)} d'_{n(3n)}}{d_{(3n+1)(3n)} d'_{(3n+1)(3n)}} \right) + \\
& \underline{I}_{3n+1} \left(\underline{Z}_{o(3n+1)} + \underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{(n)(3n+1)} d'_{(n)(3n+1)}}{r_v d'_{(3n+1)(3n+1)}} \right) + \underline{Z}_m \right) + \dots + \underline{I}_N \left(\underline{k}_f \ln \left(\frac{d_{nN} d'_{nN}}{d_{(3n+1)N} d'_{(3n+1)N}} \right) + \underline{Z}_m \right)
\end{aligned} \tag{3.2.3.4.11}$$

3.3. Reševanje sistema enačb in uporaba rezultatov

Za sistematično analizo nadomestnega vezja se opisane enačbe zapiše v matrično obliko.

Sistem enačb sestavljajo tri matrike:

- matrika $[U]$, ki vsebuje omrežne napetosti oziroma tokove tokovnih generatorjev (bremenske tokove),
- impedančno matriko $[Z]$ in
- tokovno matriko $[I]$ v kateri nastopajo neznani tokovi (I_i) posameznih vodnikov.

Med temi tremi matrikami velja splošna relacija, ki jo predstavlja enačba (3.3.1).

$$[U]=[Z][I] \quad (3.3.1)$$

V matriki $[U]$ in impedančni matriki $[Z]$ so znani elementi, tokovna matrika $[I]$ pa vsebuje neznanke. Za razrešitev sistema enačb se najprej določi inverzna impedančno matriko ($[Z]^{-1}$), katero se, skladno z enačbo (3.3.2), uporabi pri izračunu tokovne matrike.

$$[I]=[Z]^{-1}[U] \quad (3.3.2)$$

Taki sistemi enačb se v praksi rešujejo numerično s pomočjo računalnika in ustreznega programa. V okviru te naloge je bila v programu uporabljena direktna Gaussova eliminacijska metoda. Rešitev sistema enačb so tokovi v posameznih vodnikih, ki pri dimenzioniranju kablovoda lahko služijo:

- za določitev korekcijskega faktorja k_n , ki ovrednoti vpliv neenakomerne porazdelitve tokov v vodnikih na zdržni tok kablovoda,
- za določitev kratkostičnih tokov in
- za določitev impedanc kablovoda.

3.3.1 Določitev korekcijskega faktorja k_n

V predpisih oziroma standardih je za določen tip vodnika in elektroinštalacije podan trajno dovoljeni tok, ki velja samo v primeru, če je kablovod sestavljen samo iz enega tokokroga.

Isti predpisi določajo tudi korekcijske faktorje, ki upoštevajo dodatno segrevanje vodnika od sosednjih tokokrogov, ki so lahko sestavni del kablovoda ali pa pripadajo nekemu drugemu kablovodu. Pri tem je predpostavljeno, da so vsi tokokrogi obremenjeni z zdržnim tokom. To pomeni, da pri uporabi enotnega prereza faktorji veljajo samo, če so vodniki tokovno enakomerno obremenjeni. Najbolj pogosto je podan še korekcijski faktor, ki zajame vpliv temperature okolice. Zdržni tok kablovoda se določi z zmnožkom trajno dovoljenega toka, števila paralelnih tokokrogov in prej omenjenih korekcijskih faktorjev. Problem pri vsem tem pa je, da se v praksi vodniki polagajo na ravne kabelske police, ki seveda ne omogočajo neke geometrijske simetrije. Zato so tokovi v kablovodu razporejeni bolj ali manj neenakomerno. Določeno enakomernost porazdelitve tokov je sicer možno doseči s transponiranjem, vendar je ta postopek pri manjših razdaljah težje izvesti, poleg tega pa zahteva take izvajalce del, ki se na te postopke zanesljivo spoznajo. Zaradi enostavnosti polaganja in manjših stroškov za kabelske police, so v praksi vodniki kablovoda položeni eden poleg drugega, brez medsebojne zračne razdalje. Opaža se, da so deljeni kablovodi največkrat izvedeni tako, da so vodniki iste faze položeni v skupne snope (slika 2.4.2). Pri takih razvrstitvah pa je razporeditev tokov najslabša. V kolikor tak kablovod ni predimenzioniran, imajo uporabniki probleme zaradi prekomernega segrevanja določenih vodnikov. Ta problem skušajo neuspešno rešiti z zategovanjem spojev na začetku in koncu kablovoda. Namreč pri krajših razdaljah vodnikov, oziroma pri majhnih impedancah vodnikov, se lahko zaradi različnih vrednosti prehodnih upornosti galvanskih spojev, tudi poraja neenakomerna razporeditev tokov.

Zato je pri takih kablovodih že v fazi načrtovanja smiselno računsko določiti porazdelitev tokov v normalnih in kratkostičnih razmerah. Iz porazdelitve tokov se določi tok najbolj obremenjenega vodnika. Na podlagi tega podatka in skupnega toka kablovoda, se lahko določi dodatni korekcijski faktor k_n . Z upoštevanjem tega faktorja sigurno ne bo prišlo do termične preobremenitve najbolj obremenjenega vodnika.

Omenjeni korekcijski faktor k_n se lahko najbolj enostavno določi z enačbo (3.3.1.1), kjer je I_o predpostavljene tok bremena, n število paralelno vezanih tokokrogov, I_{max} pa vrednost toka v najbolj obremenjenem vodniku kablovoda.

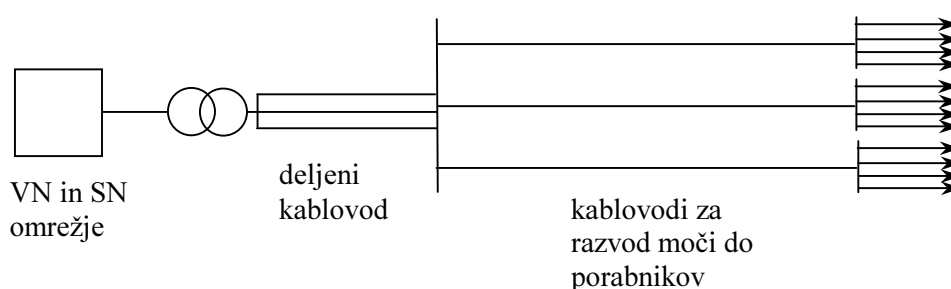
$$k_n = \frac{I_o}{n I_{max}} \quad (3.3.1.1)$$

Z uporabo tega korekcijskega faktorja je tok v najbolj obremenjenem vodniku enak toku (I_o/n), ki bi sicer tekkel po enakomerno obremenjenih vodnikih. Zaradi neenakomerne

razporeditve tokov bodo ostali vodniki obremenjeni z manjšimi tokovi, zato se tudi najbolj obremenjeni vodnik kablovoda ne bo toliko segrel, kot bi se pri enakomerni obremenitvi vseh vodnikov z zdržnim tokom. Pri enakomerni porazdelitvi tokov bi se vodnik, ki je termično najbolj obremenjen, segrel na še dopustno temperaturo, ki pri kablilih s PVC izolacijo običajno znaša 70°C. To pomeni, da uporaba korekcijskega faktorja k_n zagotavlja, da najbolj obremenjen vodnik kablovoda termično ne bo preobremenjen. Za natančnejši izračun faktorja k_n bi bilo potrebno izvesti še izračune toplotnih polj. Ta polja se lahko določi numerično z uporabo metode končnih elementov, kar lahko privede do zapletenega in dolgotrajnega postopka, saj je treba upoštevati tudi naravno konvekcijo zraka okoli segrelih kablov. Izračunavanje toplotnih polj, kjer se dejansko modelira tudi konvekcija zraka, zahteva precej časa in znanja pri numeričnem reševanju Navier-Stokesove diferencialne enačbe, zato je manj primerna metoda za dimenzioniranje običajnih kablovodov.

3.3.2 Kratkostične impedance kablovoda

Obravnnavani deljeni kablovodi so v splošnem serijsko vezani z ostalimi kablovodi, ki napajajo neke končne porabnike oziroma ostale stikalne bloke. Na koncu vsakega kablovoda je potrebno določiti najmanjši in največji kratkostični tok, in sicer z namenom zagotavljanja zadostne zaščite pred posrednim dotikom oziroma zadovoljive mehanske zdržnosti elementov na elektrodinamične sile.



Slika 3.3.2.1: Načelna blok shema značilnega primera niskonapetostnega razdelilnega sistema

Na sliki 3.3.2.1 je prikazan nek tipični izsek iz niskonapetostnega razdelilnega sistema. Za izračun kratkih stikov na kablovodih je potrebno poznati:

- impedanco sredjenapetostnega oziroma visokonapetostnega omrežja,
- impedance močnostnih transformatorjev,

- impedance kablovodov in
- impedance močnejših rotacijskih električnih strojev, ki lahko znatno prispevajo k iznosu kratkostičnih tokov.

Okvirne vrednosti impedanc kablovodov, ki so izvedeni z enim tokokrogom, se nahajajo v raznih katalogih proizvajalcev kablov oziroma v priročnikih. Impedanc deljenih kablovodov pa v priročnikih ni, saj so impedance precej odvisne od geometrije polaganja posameznih vodnikov, kot tudi od materiala nosilcev kablov. Zato je, za pravilen izračun kratkostičnih tokov v ostalih kablovodih, potrebno čim bolj točno določiti tudi impedance deljenih kablovodov. Te impedance se lahko določi že v sklopu izračunavanja kratkostičnih tokov.

Kratkostični tok enopolnega kratkega stika se po metodi simetričnih komponent izračuna z enačbo (3.3.2.1), kjer ni upoštevanega znižanja napetosti omrežja. V tej enačbi so direktna, inverzna in nična impedanca, katerih vsota se lahko združi v neko nadomestno impedanco \underline{Z}_{ns} .

$$\underline{I}_{k1} = \frac{3\underline{U}_{nf}}{\sum(\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0)} = \frac{3\underline{U}_{nf}}{\sum \underline{Z}_{ns}} \quad (3.3.2.1)$$

$$\underline{Z}_{ns} = \underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_0 \quad (3.3.2.2)$$

Impedanco \underline{Z}_{ns} deljenega kablovoda se lahko določi z enačbo (3.3.2.3), v kolikor se v nadomestnem vezju, ki je na sliki (3.2.6), za impedanco \underline{Z}_m izbere vrednost 0, za fazno napetost pa poljubno vrednost \underline{U}_{nf} . Nato se po že opisanih načinih izračuna še tokove v vodnikih, na podlagi teh pa še skupni kratkostični tok okvarjene faze \underline{I}_L .

$$\underline{Z}_{ns} = \frac{3\underline{U}_{nf}}{\underline{I}_L} \quad (3.3.2.3)$$

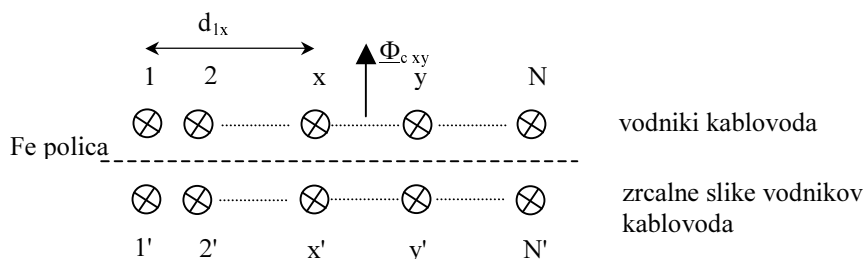
Iz impedance \underline{Z}_{ns} se sicer ne vidi razdelitev na direktno, inverzno in nično impedanco. Ta delitev tudi ni potrebna, saj se pri izračunu kratkostičnih tokov v imenovalcu enačbe (3.3.2.1) vstavi seštevek vseh direktnih, inverznih in ničnih impedanc posameznih elementov omrežja.

Med postopkom izračunavanja tokov tripolnega kratkega stika, na koncu deljenega kablovoda, se lahko določi tudi ustrezne impedance, ki se lahko uporabijo za izračun tripolnih kratkih stikov nekje drugje v niskonapetostnem omrežju. Zaradi nesimetričnega polaganja

vodnikov, so vrednosti kratkostičnih tokov posameznih faz v splošnem različne. To pomeni, da so različne tudi skupne impedance posameznih snopov vodnikov. Omenjene impedance se lahko določi iz kvocienta padca napetosti \underline{u}_L na poljubnem vodniku, ki pripada določeni fazi in skupnega toka \underline{I}_L snopa vodnikov iste faze (enačba 3.3.2.4).

$$\underline{Z}_L = \frac{\underline{u}_L}{\underline{I}_L} \quad (3.3.2.4)$$

V splošnem padec napetosti \underline{u}_L , na snopu vodnikov posamezne faze, ni znan. Izračuna se ga tako, da se v tem snopu določi napetostno enačbo poljubne zanke, ki je sestavljena iz vodnika z indeksom x in vodnikom z indeksom y (slika 3.3.2.1). Na sliki (3.3.2.1) so narisane tudi zrcalne slike vodnikov preko površine feromagnetne kableske police.



Slika 3.3.2.1: Prikaz vodnikov kablovoda in njihovih zrcalnih slik

Za zanko x-y, ki je znotraj snopa vodnikov velja napetostna enačba (3.2.2.5).

$$-\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} + \underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \underline{\Phi}_{cxy} = 0 \quad (3.3.2.5)$$

Magnetni pretok $\underline{\Phi}_{cxy}$ skozi zanko, ki jo sestavljata vodnika x in y, je definiran z enačbo (3.3.2.6a).

$$\underline{\Phi}_{cxy} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{d_{ix} d_{i'x}}{d_{iy} d_{i'y}} - \underline{I}_x \ln \frac{d_{xy} d_{x'y'}}{r_v d_{x'x}} + \underline{I}_y \ln \frac{d_{yx} d_{y'x}}{r_v d_{y'y}} \right) \quad (3.3.2.6a)$$

V enačbi (3.3.2.6a) so d_{xy} razdalje med vodniki z indeksi x in y. Indeksa x' in y' označujeta zrcalni sliki vodnikov z indeksoma x in y. V kolikor ni potrebe po zrcaljenju, se razdalje z indeksi x' in y' izpusti, oziroma se jim pripiše vrednost 1 (enačba 3.3.2.6b).

$$\underline{\Phi}_{c.xy} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{d_{ix}}{d_{iy}} - \underline{I}_x \ln \frac{d_{xy}}{r_v} + \underline{I}_y \ln \frac{d_{yx}}{r_v} \right) \quad (3.3.2.6b)$$

Prvi člen v teh dveh enačbah predstavlja doprinose magnetnih pretokov zaradi tokov v vodnikih kablovoda, ki ne sestavljajo zanke x-y. Doprinosi fluksov tokov z indeksoma x in y, ki sestavljata zanko, sta zato v tej vsoti izpuščena, saj bi v nasprotnem prišlo do singularnosti ($d_{xx}=d_{yy}=0$). Ta dva "manjkajoča" člena sta nadomeščena z drugim in tretjim sumandom, učinek magnetnega polja znotraj vodnikov x in y pa je že upoštevan v notranjih impedancah \underline{Z}_{ox} in \underline{Z}_{oy} .

Z vstavitvijo enačbe (3.3.2.6a) v enačbo (3.3.2.5), se dobi enačbo (3.3.2.7a).

$$-\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} + \underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{d_{ix} d_{i'x}}{d_{iy} d_{i'y}} - \underline{I}_x \ln \frac{d_{xy} d_{x'y}}{r_v d_{x'x}} + \underline{I}_y \ln \frac{d_{yx} d_{y'x}}{r_v d_{y'y}} \right) = 0 \quad (3.3.2.7a)$$

Logaritme s kvocienti razdalj se razstavi na ustrezne vsote logaritmov, kar je razvidno iz enačbe (3.3.2.7b). Od tu naprej pa fizikalna slika, ki se naslanja na dejanske magnetne pretoke skozi neke zaključene zanke, prehaja v drugačno, bolj matematično obdelavo problema. Logaritmi ne vsebujejo več brezdimenzijskih kvocientov razdalj, ampak predstavljajo neka števila, ki z realnimi pretoki nimajo nobene direktne zveze.

$$\begin{aligned} & -\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} - j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{r_v d_{x'x}} - j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{ix} d_{i'x}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{d_{xy} d_{x'y}} + \\ & + \underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{r_v d_{y'y}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{iy} d_{i'y}} - j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{d_{yx} d_{y'x}} = 0 \end{aligned} \quad (3.3.2.7b)$$

Člene, ki vsebujejo notranjo impedanco vodnika z indeksom y in člene z razdaljami do vodnika z indeksom x, se prestavi na desno stran enačbe (enačba 3.3.2.7c).

$$\begin{aligned}
\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{r_v d_{x'x}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{ix} d_{i'x}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{d_{yx} d_{y'x}} = \\
\underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{r_v d_{y'y}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x, y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{iy} d_{i'y}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{d_{xy} d_{x'y}}
\end{aligned} \tag{3.3.2.7c}$$

Zadnji člen leve strani enačbe predstavlja "manjkajoči" člen v vsoti na isti strani enačbe, in sicer pri indeksu $i=y$. Isto velja za zadnji člen desne strani, saj predstavlja izpuščen člen vsote (pri $i=x$), ki se nahaja na desni strani enačbe (3.3.2.7c). V kolikor se zadnja dva sumanda vključi v vsoti na levi in desni strani obravnavane enačbe, se slednjo lahko zapiše v skrajšani oziroma bolj pregledni obliki (3.3.2.8a).

$$\begin{aligned}
\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{r_v d_{x'x}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{ix} d_{i'x}} = \\
\underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{r_v d_{y'y}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{iy} d_{i'y}}
\end{aligned} \tag{3.3.2.8a}$$

Če kablovod ni inštaliran na feromagnetne konstrukcije, kot so na primer železne kabelske police, se v enačbi 3.3.2.8a enostavno izpusti vse razdalje med realnimi in zrcalnimi tokovi. Enačba (3.3.2.8a) s tem preide v bolj enostavno enačbo (3.3.2.8b).

$$\begin{aligned}
\underline{I}_x \underline{Z}_{ox} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_x \ln \frac{1}{r_v} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{ix}} = \\
\underline{I}_y \underline{Z}_{oy} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_y \ln \frac{1}{r_v} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq y}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{iy}}
\end{aligned} \tag{3.3.2.8b}$$

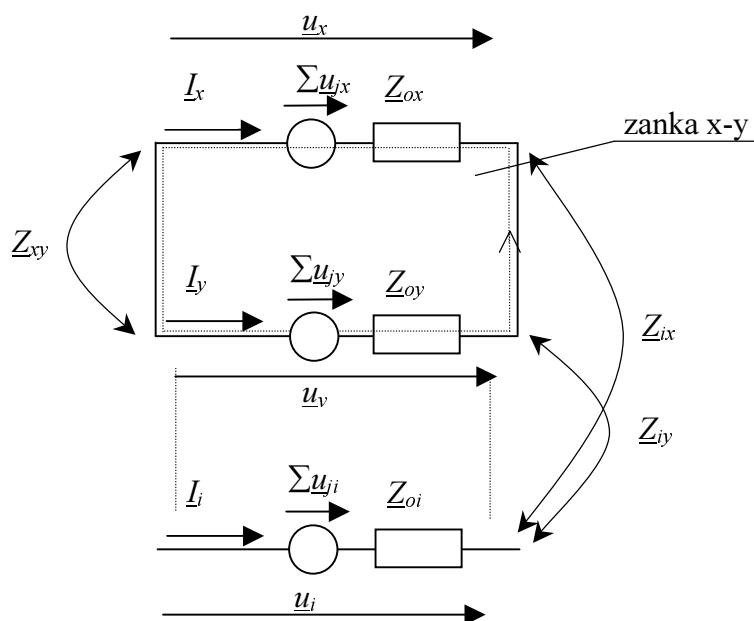
V zadnjih dveh enačbah je možno opaziti naslednje značilnosti:

- vsi posamezni sumandi predstavljajo padce napetosti v vodniku z indeksom x in vodniku z indeksom y, saj sta prvi sumand leve strani in prvi sumand desne strani tudi padca napetosti na notranjih impedancah (\underline{Z}_{ox} in \underline{Z}_{oy}) istih vodnikov,

- vsi sumandi (padci napetosti) na levi strani enačbe sestavljajo padec napetosti na vodniku z indeksom x, saj so v vseh členih, razen pri napetosti na notranji impedanci, prisotne posamezne razdalje d_{ix} ostalih i-tih vodnikov do vodnika z indeksom x in
- iz enakega razloga, vsi sumandi (padci napetosti) na desni strani enačbe pripadajo vodniku z indeksom y in na njem tvorijo skupen padec napetosti.

Na podlagi tega se lahko enačbo (3.3.2.8b) predstavi z nadomestnim vezjem na sliki (3.3.3.2), v katerem je inducirana napetost v vodnikih x in y nadomeščena z vsoto padcev napetosti na posameznih medsebojnih impedancah Z_{ix} , Z_{iy} , Z_{xy} in Z_{yx} .

$$\sum_{j=1}^N \underline{u}_{jx} = \sum_{j=1}^N \underline{I}_j \underline{Z}_{jx} = \sum_{j=1}^N \underline{u}_{jy} = \sum_{j=1}^N \underline{I}_j \underline{Z}_{jy} \quad (3.3.2.8c)$$



Slika 3.3.3.2: Nadomestno vezje, ki ustreza napetostni enačbi (3.3.2.8b)

S to potezo so že definirane impedance, ki nastopajo med posameznimi vodniki. Padec napetosti na vodniku z indeksom x, definira leva stran enačbe (3.3.2.8b), padcu na vodniku z indeksom y pa ustreza desna stran iste enačbe.

Na podlagi tega se lahko padec na poljubnem m-tem vodniku kablovoda zapiše z enačbo (3.3.2.9a), ki velja tudi pri polaganju vodnikov na feromagnetne kabelske police.

$$\begin{aligned}
\underline{u}_m &= \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_m \ln \frac{1}{r_v d_{m'm}} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{im} d_{i'm}} = \\
&= \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + \sum_{i=1}^N \underline{I}_i \underline{Z}_{im} = \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + \sum_{j=1}^N \underline{u}_{jm}
\end{aligned} \tag{3.3.2.9a}$$

V kolikor police niso feromagnetne, se padec napetosti na poljubnem m-tem vodniku izračuna po enačbi (3.3.2.9b).

$$\begin{aligned}
\underline{u}_m &= \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_m \ln \frac{1}{r_v} + j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^N \underline{I}_i \ln \frac{1}{d_{im}} = \\
&= \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + \sum_{i=1}^N \underline{I}_i \underline{Z}_{im} = \underline{I}_m \underline{Z}_{om} + \sum_{j=1}^N \underline{u}_{jm}
\end{aligned} \tag{3.3.2.9b}$$

Iz enačb (3.3.2.9a) oziroma (3.3.2.9b) se že lahko določi medsebojne impedance \underline{Z}_{xy} , kar je zaobseženo z enačbo (3.3.2.9c).

$$\underline{Z}_{xy} = \begin{cases} j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{d_{yx} d_{y'x}} & ; x \neq y \\ j\omega \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{r_v d_{x'x}} & ; x = y \end{cases} \tag{3.3.2.9c}$$

Pri tem je predpostavljeno, da so vsi vodniki kablovoda z enakimi polmeri r_v in z enakimi prevodnostmi. V primeru, da bi bili vodniki z različnimi polmeri, bi bilo treba v prejšnjih enačbah vsakemu polmeru r_v pripisati še indeks vodnika, to pa upoštevati tudi pri izračunu notranjih impedanc vodnikov.

Izračun impedanc posameznih faz se, pri tripolnem kratkem stiku, napravi po predhodnem izračunu tokov v vseh vodnikih kablovoda. Najprej se v vsakem faznem snopu vodnikov izbere poljuben vodnik, na katerem se izračuna padec napetosti \underline{u}_l . Ta padec je enak za vse vodnike v snopu, saj so na obeh straneh vezani vzporedno. Nato se s seštevanjem tokov v vseh vodnikih, ki so v tem snopu, določi fazni tok \underline{I}_l . Z enačbo (3.3.2.4) se nato izračuna še fazno impedanco \underline{Z}_l . Na ta način se dobi tri fazne impedance (\underline{Z}_{L1} , \underline{Z}_{L2} in \underline{Z}_{L3}), ki si v splošnem niso enake. Te impedance lahko služijo za izračune tripolnih kratkostičnih tokov nadaljnih tokokrogov, ki se napajajo preko obravnavanega deljenega kablovoda.

3.4 Primer izračuna porazdelitve tokov

Na podlagi opisane teorije in postopka tvorbe enačb, so bili izvedeni izračuni porazdelitve tokov, impedanc in kratkostičnih razmer, in sicer na primeru 20 m dolgega nizkonapetostnega kablovoda, ki povezuje močnostni transformator in nizkonapetostni razdelilni stikalni blok (slika 2.4.1).

Transformator ima nazivno moč $S_n=1000$ kVA, kratkostično napetost $u_k=5,68$ %, nazivne izgube v bakru $P_{cu}=11460$ W, prestavo 20 (10) kV / 0,4 kV in je v vezavi Dyn.

Zdržni tok kablovoda mora biti večji ali enak nazivnemu toku transformatorja, ki je določen z enačbo (3.4.1) in znaša 1443,37 A.

$$I_{ni} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{10^6}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1443,37 \text{ A} \quad (3.4.1)$$

Izbrani so trije paralelni tokokrogi ($n=3$), ki naj bi potekali po železni kabelski polici. Največja oziroma najneugodnejša predvidena temperatura okolice znaša 30°C. Korekcijski faktor k_t , ki zajame vpliv temperature okolice ima v tem primeru vrednost 1. Korekcijski faktor k_v , za tri vzporedno položene tokokroge, znaša [7]:

- $k_v=0,8$, če so vodniki posameznih tokokrogov razvrščeni v trikot;
- $k_v=0,85$, če so vodniki posameznih tokokrogov položeni v vodoravno zaporedje.

Zdržni tok celotnega kablovoda je pri enakomerno razporejenih tokovih določen z enačbo (3.4.2). V tej enačbi nastopajo trajno dovoljeni tok I_t , korekcijska faktorja (k_t , k_v) in število vzporedno priključenih tokokrogov (n). Trajno dovoljeni tok je zdržni tok vodnika v kablovodu, ki je sestavljen samo iz enega tokokroga in pri točno določenih referenčnih pogojih, kot so na primer temperatura okolice, način polaganja oziroma vrsta napeljave in fazni sistem. Vrednosti trajno dovoljenih tokov in korekcijskih faktorjev so podane v tabelah standardov in proizvajalcev kablov. Če se poleg vodnikov tokokroga na kabelski polici nahajajo še obremenjeni vodniki drugih tokokrogov, ki napajajo isti ali pa nek drug porabnik, le ti zaradi neposredne bližine dodatno segrevajo obravnavani tokokrog, zato je potrebno zdržni tok vodnika v tem tokokrogu zmanjšati s korekcijskim faktorjem k_v .

$$I_z = I_t n k_t k_v \quad (3.4.2)$$

Najmanjša dopustna vrednost zdržnega toka je bremenski tok, ki je v tem primeru nazivni tok transformatorja.

$$I_t n k_t k_v \geq I_{nt} \quad \Rightarrow \quad I_t \geq \frac{I_{nt}}{n k_t k_v} \quad (3.4.3)$$

Najmanjši dopustni trajno dovoljeni tok ($I_{t \min}$) vodnikov določa enačba (3.4.4).

$$I_{t \min} = \frac{I_{nt}}{n k_t k_v} \quad (3.4.4)$$

Za obravnavani kablovod se iz tabel izbere vodnike, ki imajo trajno dovoljeni tok I_t večji ali enak $I_{t \min}$. Dejanski zdržni tok I_{zv} posameznega vodnika v kablovodu je določen z enačbo (3.4.5).

$$I_{zv} = I_t k_t k_v \quad (3.4.5)$$

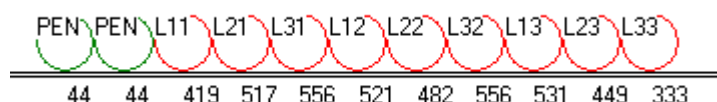
Z enačbo (3.4.3) sta v tabeli 3.4.1 določena trajno dovoljena tokova za dva načina polaganja vodnikov kablovoda. Pri tem je bilo predpostavljeno, da so tokovi v vodnikih razporejeni povsem enakomerno. Take predpostavke so v projektantski praksi relativno pogoste. Pri razvrščanju vodnikov v trikot znaša najmanjši dopustni presek bakrenih vodnikov 300 mm^2 , pri razvrščanju v vodoravno zaporedje pa zadostuje že presek 240 mm^2 .

način polaganja	I_{nt} (A)	n	k_t	k_v	$I_{t \min}$ (A)	S_{min} (mm^2)	I_t (A)	I_{zv} (A)
trikot	1443,37	3	1	0,8	601,4	300	610	488
vodoravno zaporedje	1443,37	3	1	0,85	566,03	240	590	501,5

Tabela 3.4.1: Termično dimenzioniranje kablovoda, če bi bili vodniki enakomernoobremenjeni

(S_{min} je najmanjši standardizirani presek vodnika, ki ima trajno dovoljeni tok večji od minimalnega dopustnega trajno dovoljenega toka $I_{t \min}$)

Na sliki 3.4.1 je prikazana razporeditev vodnikov tako, da so vodniki, ki pripadajo različnim fazam, položeni v vodoravno zaporedje, in sicer na železno nosilno polico. Pod vsakim vodnikom je navedena pripadajoča efektivna vrednost toka. Fazni vodniki so označeni z oznako Lxy. Prvo število (x) označuje fazo na katero je ta vodnik priključen, drugo (y) pa zaporedno številko vodnika v snopu.

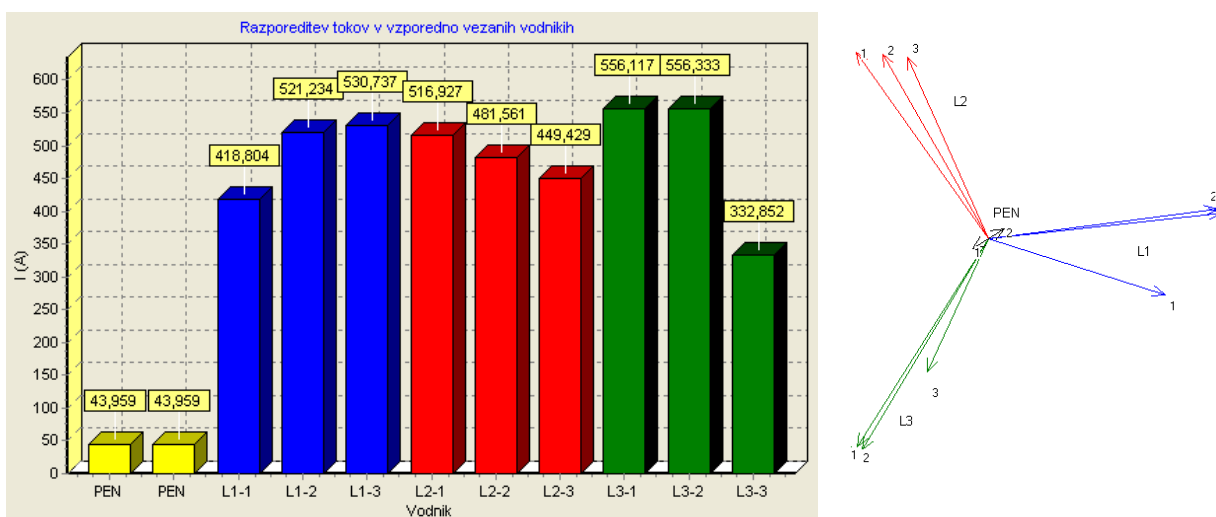


Slika 3.4.1: Vodniki s presekom 240 mm^2 , na železni polici in v vodoravnem zaporedju

različnih faz; $k_n=0,8648$, $P_{izg}=171,19 \text{ W/m}$, $I_z=1301 \text{ A}$

Zdržni tok ($I_{zv}=501,5 \text{ A}$) vodnika s presekom 240 mm^2 presegajo tokovi v vodnikih L₂₁, L₃₁, L₁₂, L₃₂ in L₁₃, kar pomeni, da se bodo nekateri vodniki segreli nad dovoljeno temperaturo.

Slika 3.4.2 prikazuje vrednosti tokov v stolpnem diagramu, kjer so tokovi vodnikov posameznega snopa oziroma faze, zaradi boljše vizualne primerjave, prikazani v skupinah. Vrstni red tokov v diagramu zato ni enak vrstnemu redu vodnikov na kabelski polici (redosled vodnikov je razviden iz slike 3.4.1).



Slika 3.4.2: Razvrstitev tokov v vodnikih s presekom 240 mm^2 , ki so položeni v vodoravnem zaporedju različnih faz

Pri enakomerni razporeditvi tokov bi efektivni tok v posameznem faznem vodniku znašal $481,12 \text{ A}$ (enačba 3.4.5).

$$I_e = \frac{I_{nt}}{n} = \frac{1443,37}{3} = 481,12 \text{ A} \quad (3.4.5)$$

Razmerje med tokom pri enakomerni razporeditvi tokov in dejanskim največjim tokom znaša $0,8648$ (enačba 3.4.6).

$$k_n = \frac{I_e}{I_{\max}} = \frac{481,12}{556,33} = 0,8648 \quad (3.4.6)$$

Faktor k_n se pri dimenzioniranju kablovoda lahko uporabi kot dodatni korekcijski faktor k_n , ki zajame vpliv neenakomerne razporeditve tokov. Vrednost tega faktorja seveda velja samo za ta primer razvrščanja vodnikov. S spreminjanjem razvrstitve, števila in preseka vodnikov, se ta faktor spreminja. V kolikor bi bili na levi strani kablovoda trije zaščitni vodniki, bi faktor k_n znašal $0,8655$. Izboljšanje faktorja je pri tem zanemarljivo majhno.

Enačbo (3.4.4), ki služi za izračun minimalnega dopustnega trajno dovoljenega toka, se z namenom upoštevanja neenakomerne razvrstitve tokov, dopolni s faktorjem k_n (enačba 3.4.7).

Pri predpostavljani geometriji polaganja in številu paralelnih tokokrogov je potrebno ta faktor določiti posebej, in sicer za vsak potencialno ustrezen presek vodnika.

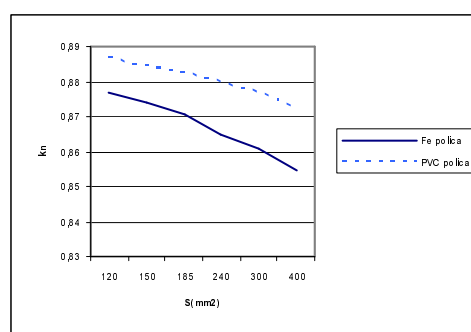
$$I_{i \min} = \frac{I_{ni}}{n k_t k_v k_n} \quad (3.4.7)$$

S stališča ekonomike obratovanja kablovoda je lahko zanimiv tudi vpogled v ohmske izgube, ki so bile določene po enačbi (3.4.8). Za obravnavano geometrijo polaganja (slika 3.4.1) na železno polico, znašajo izgube $P_{izg}=171,19$ W/m. Pri enaki geometriji kablovoda in plastični kabelski polici, bi izgube znašale 162,57 W/m, kar je približno 5 % manj izgub, kot pri uporabi železnih kabelskih polic. V izračunih so bile zajete samo izgube v vodnikih, ne pa tudi v kabelskih policah.

$$P_{izg} = \sum_{i=1}^{3n+m} |I_i|^2 \operatorname{Re}(Z_{0i}) \quad (3.4.8)$$

Z zmanjšanjem preseka vodnika se faktor k_n približuje vrednosti 1, saj ima vodnik pri manjšem preseku večjo notranjo impedanco, kar pomeni, da inducirane napetosti v zankah poženejo manjše tokove. Slednji dejansko povzročajo neenakomernost porazdelitve tokov, zato se faktor k_n pri manjših presekih izboljša. Na sliki 3.4.3 so navedeni faktorji k_n , in sicer za obravnavani način polaganja vodnikov, pri različnih presekih vodnikov in za dve vrsti materiala kabelskih polic.

S	k_n	k_n
mm ²	za Fe polico	za PVC polico
120	0,8767	0,8864
150	0,874	0,8845
185	0,8703	0,8827
240	0,8648	0,8797
300	0,8606	0,8768
400	0,8545	0,8725

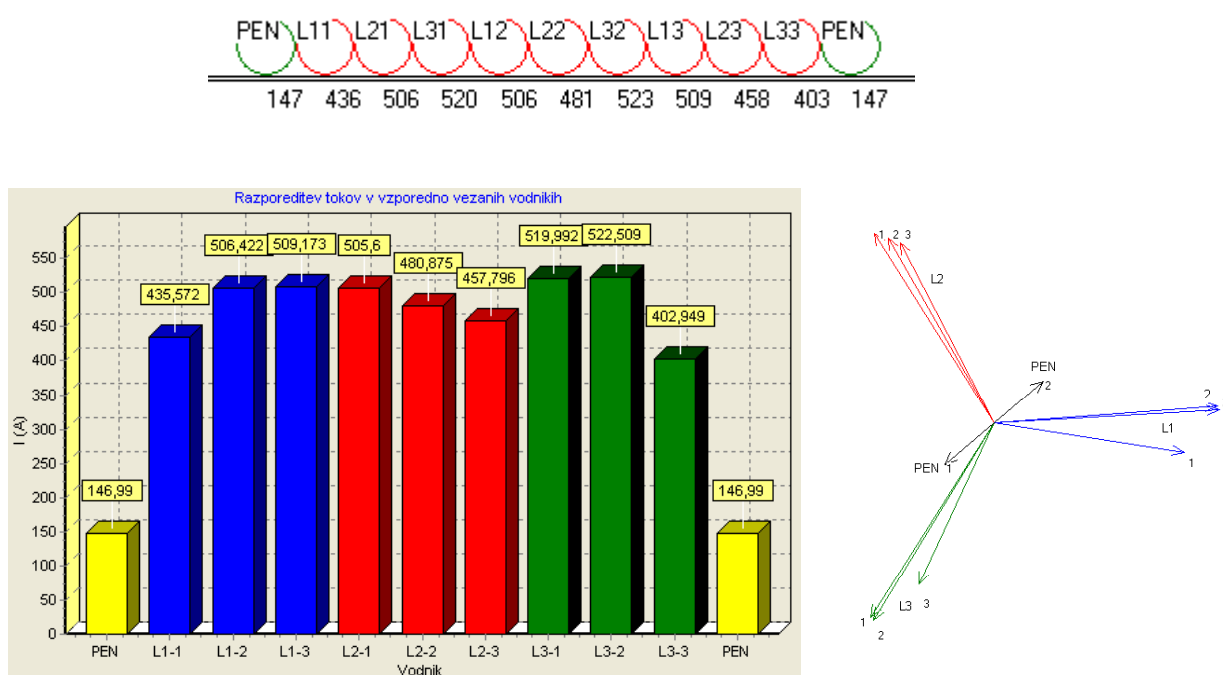


Slika 3.4.3: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov na sliki 3.4.1

Faktorji k_n so manjši pri vodnikih, ki so položeni na železne police. Vzrok je v tem, da ima feromagnetni material glede na zrak oziroma plastične police mnogo manjšo magnetno

upornost, kar ima za posledico drugačno konfiguracijo magnetnega polja. Magnetne silnice na površino feromagnetne kableske police vpadajo približno pravokotno. Vodniki so v neposredni bližini kableske police, zato se v tem primeru, glede na razmere pri plastičnih policah, skozi določeno zanko pretaka večji delež fluksa. Zato se povečajo tudi inducirane napetosti in s tem tokovi v zankah, kar povzroči poslabšanje enakomernosti obremenitve vodnikov. Ker so izgube v vodnikih odvisne od kvadrata toka, se neenakomernost porazdelitve tokov pozna tudi na skupnih izgubah kablovoda.

V kolikor se zaščitno nevtralna vodnika locira na levo in desno stran kablovoda, se pri preseku 240 mm^2 tokovi razvrstijo kot je prikazano na sliki 3.4.4.



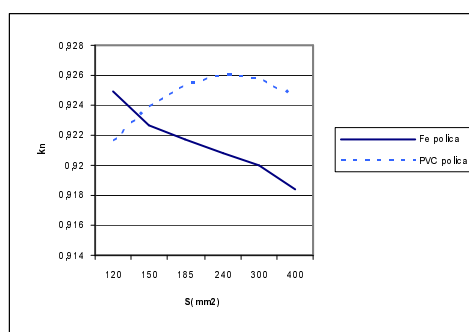
Slika 3.4.4: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm^2 , kjer so vodniki, ki pripadajo različnim fazam, razvrščeni v vodoravna zaporedja na železni polici, zaščitni vodniki pa so na levi in desni strani kablovoda; $k_n=0,9208$, $P_{izg}=170,26 \text{ W/m}$, $I_z=1385,3 \text{ A}$

Opazen je znaten porast toka v zaščitnih vodnikih, kar je posledica povečane medosne razdalje med obema zaščitnima vodnikoma. Zanka obeh zaščitnih vodnikov zaobjame večino magnetnega pretoka tokov v vseh faznih vodnikih, z večjo širino zanke pa se poveča tudi sama reaktanca zanke. Zaradi večje reaktance, inducirani tok v zanki še bolj zaostaja za inducirano napetostjo, s tem pa se poveča tista komponenta fazorja fluksa, ki deluje v nasprotni smeri fazorja fluksa faznih vodnikov. S tem inducirani tok v zaščitnih vodnikih delno skompenzira magnetni pretok zaradi tokov v faznih vodnikih, zato se v zankah faznih

vodnikov inducirajo manjše napetosti, kar privede do boljše enakomernosti porazdelitve tokov. Iz istega razloga skoraj izgine razlika med faktorjema k_n kablovoda na železni in plastični polici, saj zanka zaščitnih vodnikov v obeh primerih kompenzira magnetne pretoke tokov v faznih vodnikih.

Za vodnike s presekom 240 mm^2 znaša v tem primeru faktor $k_n=0,9208$ in je za 6,47 % večji od faktorja kablovoda, kjer sta oba zaščitna vodnika postavljena na levo stran vodnikov (slika 3.4.1). To pomeni, da prestavitev enega zaščitnega vodnika na desno stran vodnikov, povzroči povečanje zdržnega toka kablovoda, in sicer za približno 6,47 %.

S	k_n	k_n
mm^2	za Fe polico	za PVC polico
120	0,925	0,9216
150	0,9227	0,92391
185	0,9218	0,9253
240	0,9208	0,926
300	0,92	0,9257
400	0,9184	0,9246



Slika 3.4.5: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police za razvrstitev vodnikov, ki je predstavljena na sliki 3.4.4

Izgube kablovoda na železni polici znašajo $170,26 \text{ W/m}$, na plastični pa $162,72 \text{ W/m}$. Očitno se pri prestavitvi zaščitnega vodnika na desno stran, skupne izgube v vodnikih praktično ne spremenijo. Na račun zmanjšanja izgub v faznih vodnikih (večja enakomernost razporeditve tokov), se poveča delež izgub v zaščitnih vodnikih.

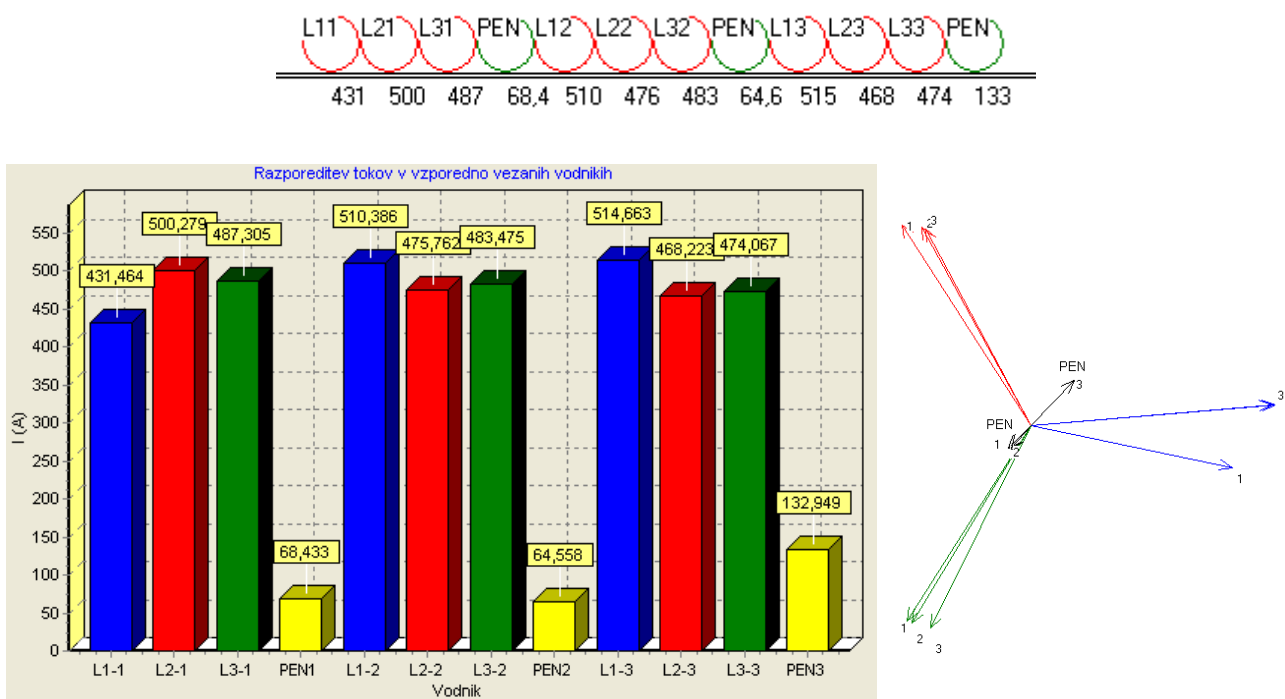
Razvidno je, da bodo v obeh primerih razvrščanja vodnikov v vodoravno zaporedje, posamezni vodniki termično preobremenjeni. To pomeni, da je treba zvečati presek vodnika vsaj za eno stopnjo in znova preveriti termično zdržnost kablovoda. V kolikor se presek vodnikov poveča na vrednost 300 mm^2 , se po enačbi (3.4.7) dobi minimalni trajno dovoljeni tok v vrednosti $657,71 \text{ A}$, če sta oba zaščitna vodnika položena na levi strani kablovoda.

$$I_{t \min} = \frac{I_{nt}}{n k_t k_v k_n} = \frac{1443,37}{3 \cdot 0,85 \cdot 0,8606} = 657,71 \text{ A}$$

Faktor $k_n=0,8606$ je bil vzet iz tabele na sliki 3.4.3. Trajno dovoljeni tok vodnikov s presekom 300 mm^2 , ki so razporejeni v vodoravno zaporedje, znaša 680 A in je večji od minimalnega ($657,7 \text{ A}$), zato ti vodniki ne bodo termično preobremenjeni.

Kablovodu, ki je na sliki 3.4.4, se faktor k_n določi iz tabele 3.4.5, ki pri preseku 300 mm^2 zavzame vrednost 0,92. Tudi v tem primeru vodniki ne bodo termično preobremenjeni, saj je faktor k_n večji od faktorja, ki pripada kablovodu na sliki 3.4.1.

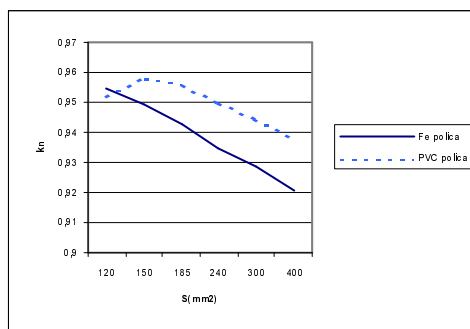
Zaščitno nevtralni vodniki se lahko položijo tudi poleg vsakega posameznega tokokroga (slika 3.4.6). V tem primeru je število zaščitnih vodnikov enako številu vzporednih tokokrogov. S tem je okoli posameznih tokokrogov, razen pri prvem na levi strani, napravljena kratkostična zanka, ki duši magnetni pretok faznih vodnikov. Faktor k_n pri tej konfiguraciji znaša 0,9348 in je za 8,5 % večji od faktorja kablovoda na sliki 3.4.1.



Slika 3.4.6: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm^2 , kjer so vodniki, ki pripadajo različnim fazam, razvrščeni v vodoravna zaporedja na železni polici, zaščitni vodniki pa so položeni poleg vseh posameznih tokokrogov; $k_n=0,9348$, $P_{izg}=168,22 \text{ W/m}$, $I_z=1406,4 \text{ A}$

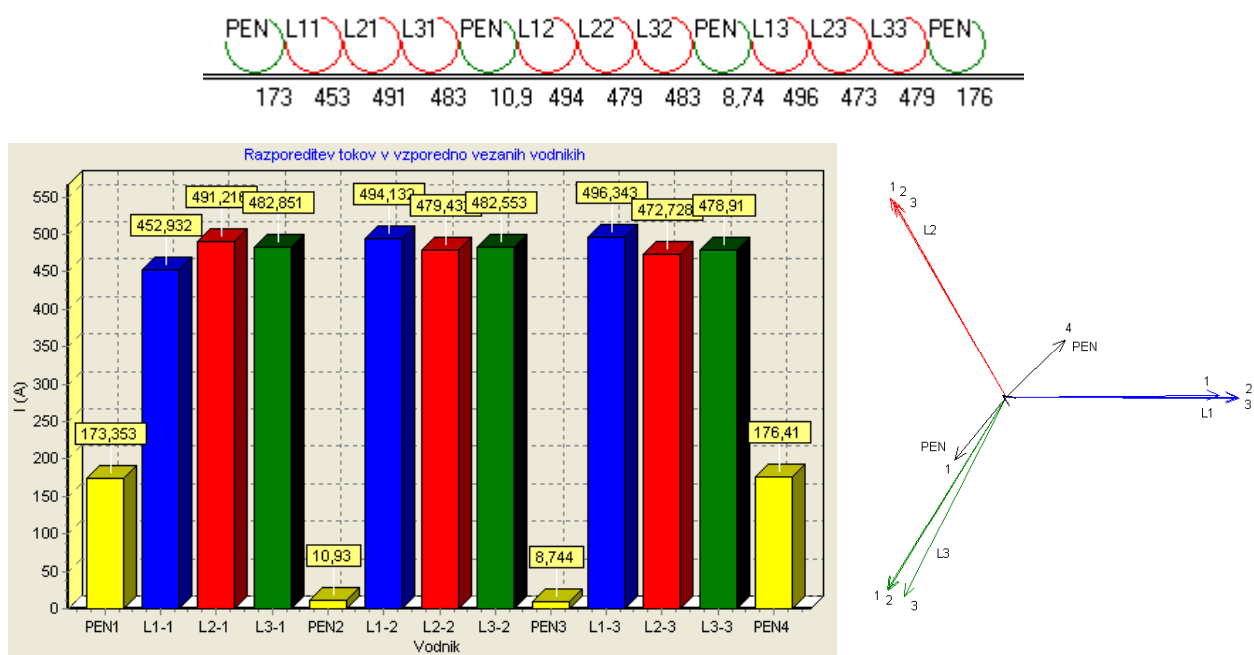
Enakomernost tokov se glede na prejšnja dva načina razporeditve vodnikov, nekoliko poveča. Zdržni tok kablovoda na sliki 3.4.6 znaša 1406,4 A, kar pomeni, da bi bili nekateri vodniki preobremenjeni. Če preseke vodnikov povečamo na 300 mm^2 , se kablovod lahko obremeni s tokom 1516 A. Bremenski tok znaša 1443,43 A, zato bi kablovod ustrezal termičnim obremenitvam. V tem primeru bi izgube znašale 141,49 W/m, ki so seveda manjše zaradi večjih presekov vodnikov.

S	k_n	k_n
mm ²	za Fe polico	za PVC polico
120	0,955	0,9521
150	0,9495	0,9582
185	0,9429	0,9559
240	0,9348	0,9502
300	0,9289	0,9449
400	0,9206	0,9382



Slika 3.4.7: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police za razvrstitev vodnikov, ki je podana na sliki 3.4.6

V kolikor se na levi strani kablovoda, ki je na sliki 3.4.6, doda še en zaščitni nevtralni vodnik, tako da bo prvi tokokrog na levi strani kablovja tudi v kratkostični zanki, se dobi razporeditev vodnikov in tokov na sliki 3.4.8.



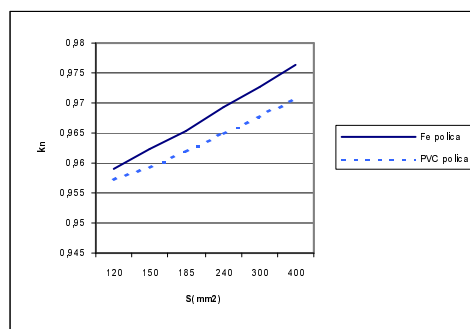
Slika 3.4.8: Tokovi v vodnikih s preseki 240 mm², kjer so vodniki, ki pripadajo različnim fazam, razvrščeni v vodoravna zaporedja na železno polico, zaščitni vodniki so položeni poleg vseh posameznih tokokrogov, na levi strani kablovoda pa je nameščen dodatni zaščitni vodnik; $k_n=0,9693$, $P_{izg}=170,02$ W/m, $I_z=1458,3$ A.

Zdržni tok tega kablovoda znaša 1458,3 A in je večji od bremenskega toka, ki znaša 1443,37A. Zato bi bil ta kablovod ustrezen in to pri presekih vodnikov 240 mm².

V tem primeru je več zaščitnih vodnikov, kot pa tokokrogov. Predpisi dovoljujejo, da je skupni presek zaščitnih vodnikov vsaj polovico skupnega preseka faznih vodnikov, tako da s tega stališča zadostujeta že dva vodnika s presekom 240 mm^2 . Skupni presek vseh vodnikov kablovoda na sliki 3.4.8 znaša 3120 mm^2 . Ustreza pa tudi kablovod na sliki 3.4.1, a z vodniki s presekom 300 mm^2 . Ta kablovod bi imel skupni presek vodnikov 3300 mm^2 . Skupna teža vodnikov na sliki 3.4.8 bi bila, kljub večjemu številu zaščitnih vodnikov, še vedno manjša od skupne teže vodnikov na sliki 3.4.1 (s presekom 300 mm^2). Poleg tega so pri kablovodu na sliki 3.4.8, fazni vodniki veliko bolj enakomerno obremenjeni, kar je razvidno iz slike 3.4.9. Vzrok za boljšo enakomerno obremenitev vodnikov je v dodatnih "lokalnih" kratkostičnih zankah, ki so napeljane okoli vsakega vzporednega tokokroga. S tem se dušijo magnetna polja faznih vodnikov v zanki, kot tudi polja tokov vodnikov izven zanke.

Slika 3.4.9 prikazuje odvisnost faktorja k_n od presekov vodnikov. V območju presekov od 120 mm^2 do 400 mm^2 je malenkostno boljša enakomernost razporeditve tokov pri vodnikih, ki so inštalirani na feromagnetne kabelske police. Pri prejšnjih načinih razporejanja vodnikov pa je iz rezultatov razvidno, da je enakomernost razporeditve tokov večinoma boljša, če so vodniki na plastičnih policah.

S	k_n	k_n
mm^2	za Fe polico	za PVC polico
120	0,9591	0,9575
150	0,9622	0,9595
185	0,9654	0,9619
240	0,9693	0,9649
300	0,9726	0,9677
400	0,9763	0,971

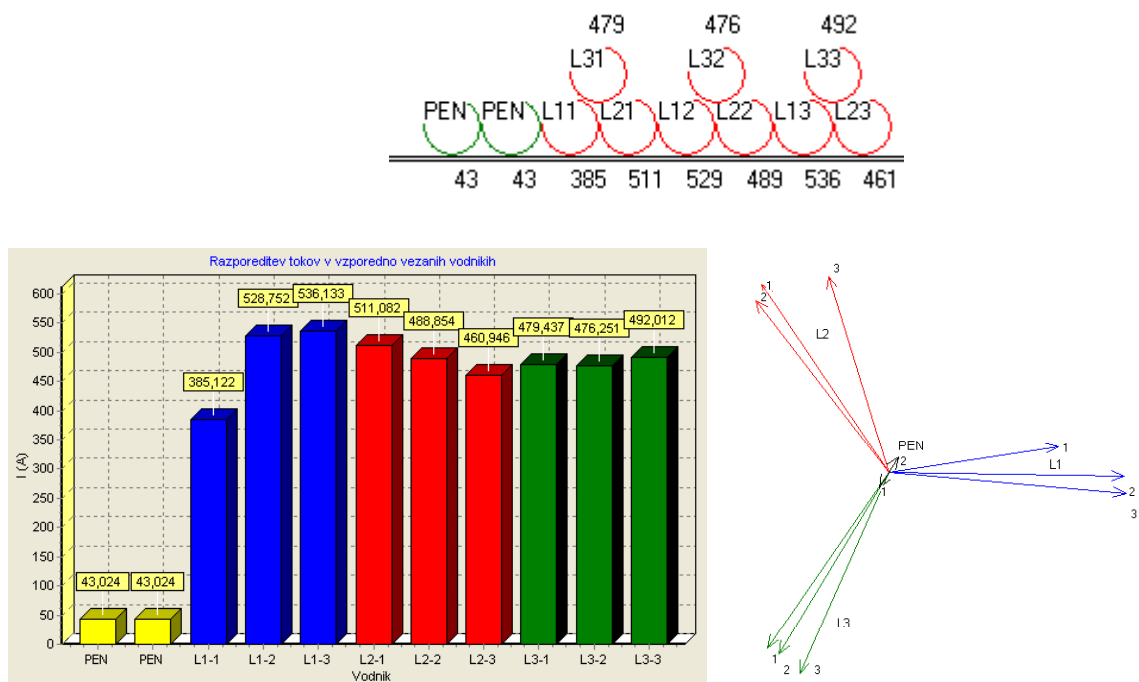


Slika 3.4.9: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov, ki je podana na sliki 3.4.8

Pogosto se vodniki razvrščajo v trikotno formo. Zaščitne vodnike se pri tem zopet lahko locira ali vse na eno stran kablovoda ali pa se jih posamezno postavi zraven vsake trojice faznih vodnikov. Vodniki, razvrščeni v trikotno formo, imajo manjše zdržne tokove, ker se slabše hladijo glede na vodnike v vodoravnem zaporedju. Zato, za obravnavani primer obremenitve ($1443,37 \text{ A}$) in pri popolnoma enakomerni obremenitvi vodnikov, zadostujejo šele vodniki s presekom 300 mm^2 . Poleg tega je termični faktor k_v za tri vzporedno položene

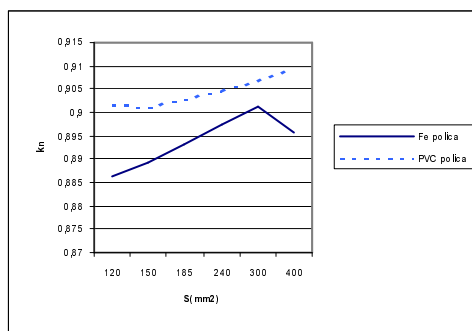
tokokroge, ki imajo vodnike v trikotni formi ($k_v=0,8$), manjši od faktorja pri vodnikih v vodoravnem zaporedju ($k_v=0,85$).

Zaradi primerljivosti porazdelitve tokov z rezultati pri prejšnjih načinih polaganja vodnikov, so tudi za naslednje konfiguracije kablovodov podani tokovi pri presekih 240 mm^2 .



Slika 3.4.10: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm^2 , ki so razporejeni v trikot (na železno polico) in zaščitnima vodnikoma na levi strani kablovoda ($k_n=0,8974$, $P_{izg}=170,32 \text{ W/m}$, $I_z=1141,5 \text{ A}$)

S	k_n	k_n
mm^2	za Fe polico	za PVC polico
120	0,8864	0,9017
150	0,8892	0,9014
185	0,8933	0,9030
240	0,8974	0,9048
300	0,9011	0,9069
400	0,8956	0,9095



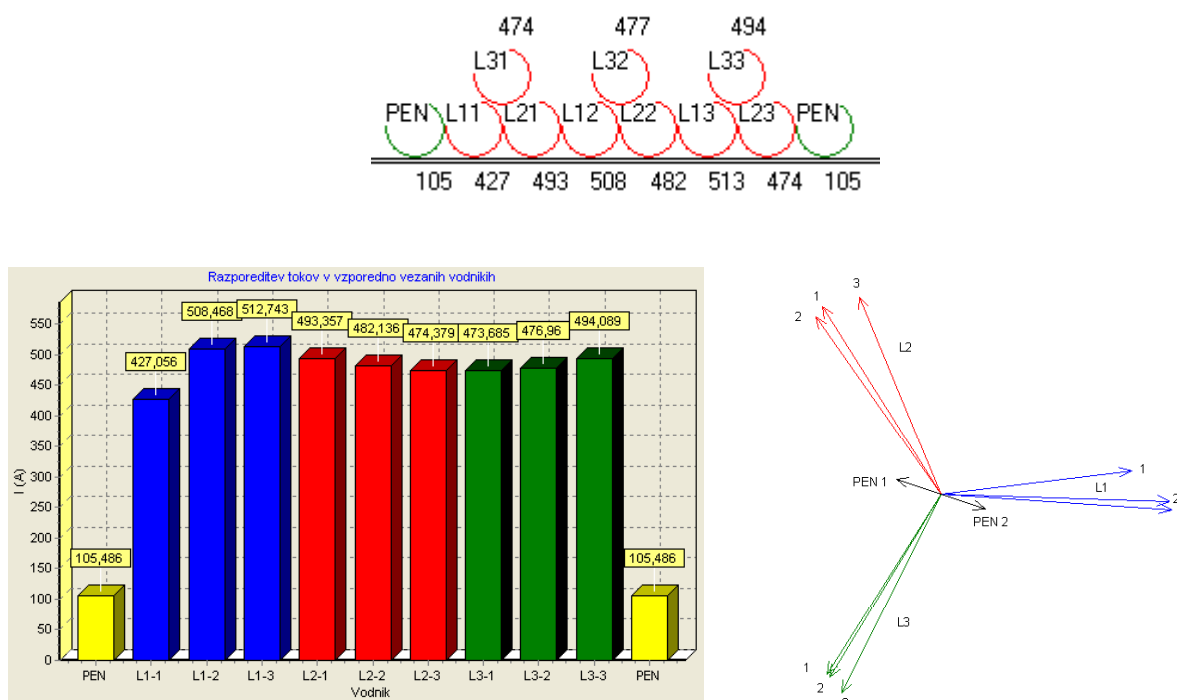
Slika 3.4.11: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov, ki je definirana na sliki 3.4.10

V tem primeru (slika 3.4.10) tudi vodniki s preseki 300 mm^2 ne bi bili primerni za prenos moči med obravnavanim transformatorjem in nizkonapetostnim razdelilnim blokom. Za te vodnike ima faktor k_n vrednost 0,9011. Trajno dovoljeni tok I_t posameznega vodnika, ki je v

sklopu trikotne konfiguracije trifaznega tokokroga, znaša 610 A. Zdržni tok I_z kablovoda s tremi takimi paralelnimi tokokrogi znaša $I_z = n \cdot I_r \cdot k_v \cdot k_r \cdot k_n = 3 \cdot 610 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,9011 = 1319,02$ A in je manjši od nazivnega toka transformatorja.

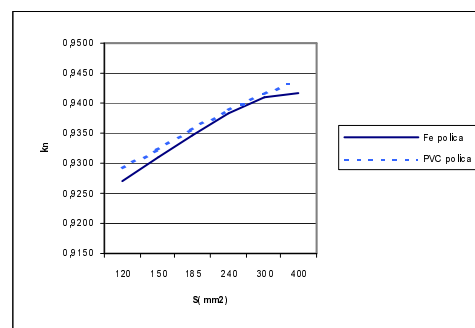
Zaradi tega bi bilo treba uporabiti vodnike s presekom 400 mm^2 , ki imajo trajno dovoljeni tok 720 A. Z upoštevanjem faktorjev $k_n = 0,8956$, $k_v = 0,8$ in $k_r = 1$ bi zdržni tok kablovoda znašal 1547,6 A in bi bil večji od nazivnega toka bremena oziroma transformatorja.

Če se en zaščitni vodnik prestavi na desno stran kablovoda, dobimo rezultate na sliki 3.4.12.



Slika 3.4.12: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm^2 , ki so razporejeni v trikot (na železno polico) in z zaščitnim vodnikoma na levi in desni strani kablovoda ($k_n = 0,9383$, $P_{izg} = 170,11 \text{ W/m}$, $I_z = 1193,5 \text{ A}$)

S	k_n	k_n
mm^2	za Fe polico	za PVC polico
120	0,9270	0,9294
150	0,9309	0,9324
185	0,9346	0,9357
240	0,9383	0,9390
300	0,9411	0,9415
400	0,9416	0,9439

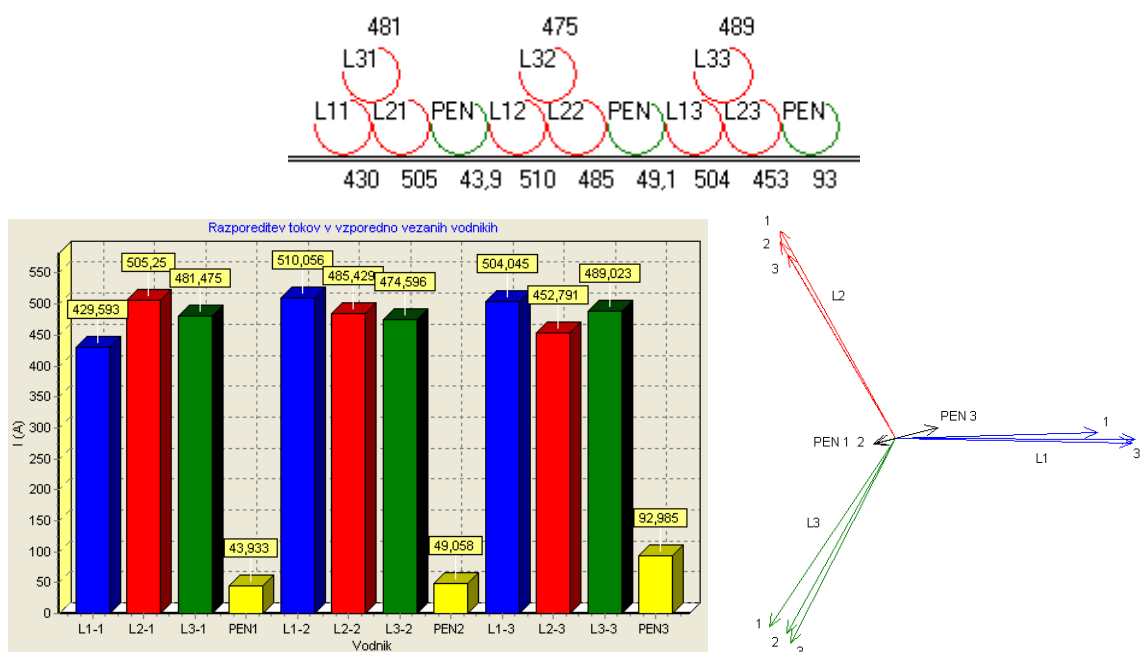


Slika 3.4.13: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police za razvrstitev vodnikov, ki je predočena na sliki 3.4.12.

Glede na razporeditev tokov v kablovodu, ki je prikazan na sliki 3.4.10, je vidno izboljšanje enakomernosti razporeditve tokov in s tem faktorjev k_n . Vzrok je v tem, da zaščitni vodniki zaobjamejo vse vodnike in s tem dušijo magnetna polja tokov v faznih vodnikih.

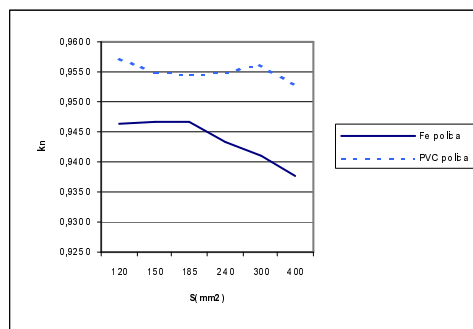
Zdržni tok kablovoda s preseki vodnikov 300 mm^2 znaša $1377,8 \text{ A}$ in je manjši od nazivnega toka transformatorja, zato ta presek ni ustrezen za ta način razvrščanja vodnikov. Joulske izgube v najbolj obremenjenem vodniku so $(1/k_n)^2$ – krat večje od izgub v vodniku, ki pripada kablovodu z enakomerno razporejenimi tokovi. V najbolj obremenjenem vodniku se sprošča približno 13 % več izgub, in sicer glede na izgube v vodniku ob enakomerni razporeditvi tokov. Zato se pri tej konfiguraciji kablovoda lahko uporabi vodnike s preseki, ki so večji od 300 mm^2 .

V kolikor se kablovod izvede nekoliko bolj bogato, tako da se uporabi tri zaščitne vodnike, razvrsti pa se jih poleg vsakega tokokroga, se dobi razmere na sliki 3.4.14. Faktor k_n se s tem najbolj popravi pri presekih 120 mm^2 , 150 mm^2 in 185 mm^2 . Pri vodnikih s preseki 400 mm^2 in 300 mm^2 , v kolikor so na feromagnetni polici, se faktor celo nekoliko poslabša. Primerjave faktorjev se nanašajo na kablovod, ki je definiran na sliki 3.4.12. Vodniki s prerezom 300 mm^2 zato tudi pri tem načinu razvrščanja (slika 3.4.14) niso primerni za povezavo transformatorja moči 1 MVA z nizkonapetostnim stikalnim blokom, saj je zdržni tok kablovoda premajhen ($I_z=1377,6 \text{ A}$).



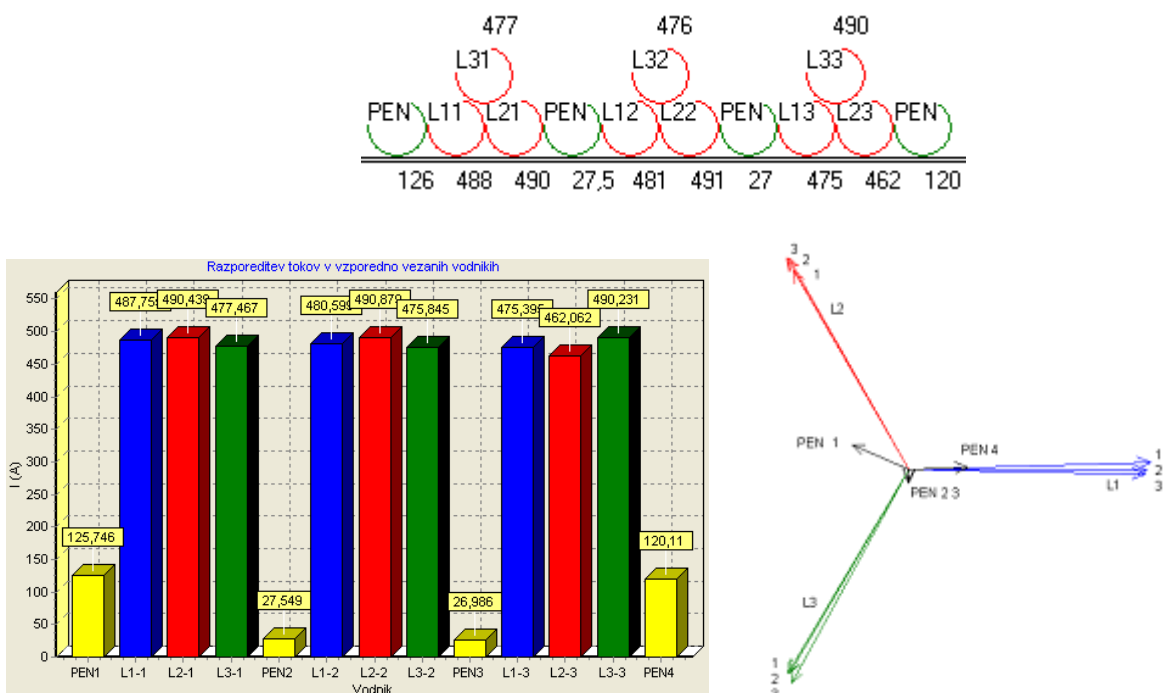
Slika 3.4.14: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm^2 , ki so razporejeni v trikot in z zaščitnimi vodniki poleg posameznega tokokroga kablovoda ($k_n=0,9432$, $P_{izg}=167,55 \text{ W/m}$, $I_z=1199,7 \text{ A}$)

S	k_n	k_n
mm ²	za Fe polico	za PVC polico
120	0,9463	0,9572
150	0,9466	0,9550
185	0,9466	0,9548
240	0,9433	0,9549
300	0,9410	0,9563
400	0,9376	0,9529



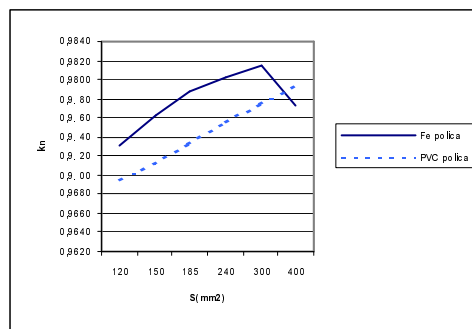
Slika 3.4.15: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov, ki je podana na sliki 3.4.14.

Če se na levo stran kablovoda doda še en zaščitni vodnik, se enakomernost razporeditve tokov po posameznih vodnikih bistveno izboljša, kar je razvidno iz slik 3.4.16 in 3.4.17. Zdržni tok vodnikov s preseki 300 mm², ki so položeni na železne police, znaša 1436,9 A, kar strogo gledano ne ustreza predvideni obremenitvi. V najbolj obremenjenem vodniku bo za 3,8 % več joulskih izgub kot pa v vodniku, ki bi bil del kablovoda z enakomerno obremenjenimi vodniki.



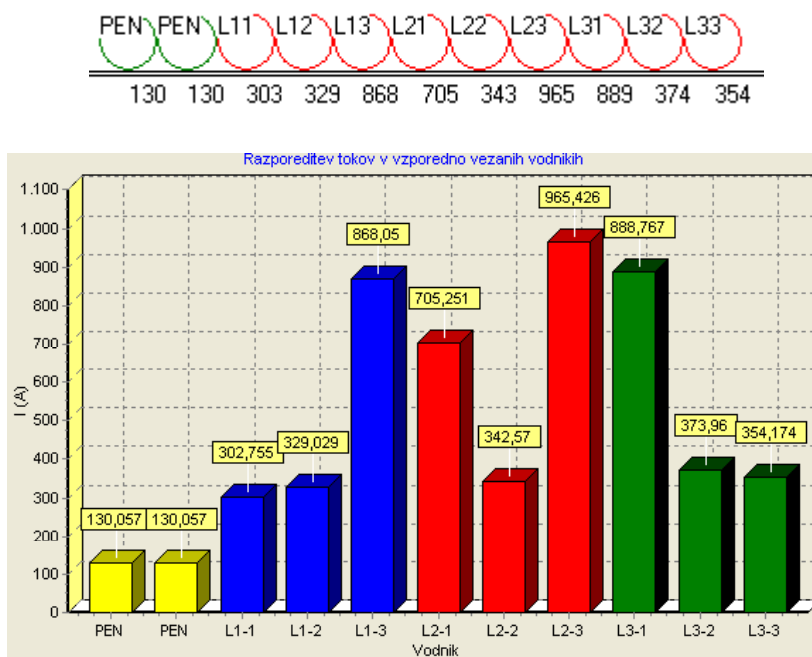
Slika 3.4.16: Tokovi v vodnikih s presekom 240 mm², ki so razporejeni v trikot (na železni polici), z zaščitnimi vodnik poleg posameznega tokokroga ter dodatnim zaščitnim vodnikom na levi strani kablovoda ($k_n=0,9801$, $P_{izg}=169,13$ W/m, $I_z=1247$ A)

S	k_n	k_n
mm ²	za Fe polico	za PVC polico
120	0,9732	0,9695
150	0,9762	0,9711
185	0,9787	0,9732
240	0,9801	0,9756
300	0,9815	0,9775
400	0,9774	0,9794



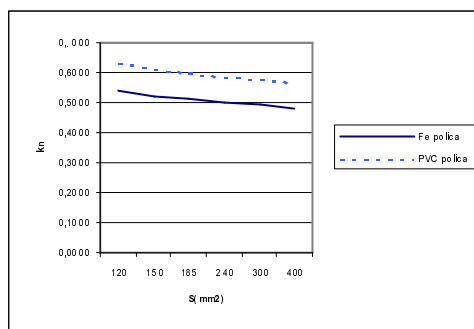
Slika 3.4.17: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov, ki je podana na sliki 3.4.16.

Popolnoma neustrezna je razvrstitev vodnikov iste faze v vodoravno zaporedje, kar je razvidno že iz grafične predstavitev razporeditve tokov v takem kablovodu (slika 3.4.18). Izgube so kar za približno 65 % večje od izgub, ki nastajajo pri ostalih opisanih načinih razvrščanja vodnikov.



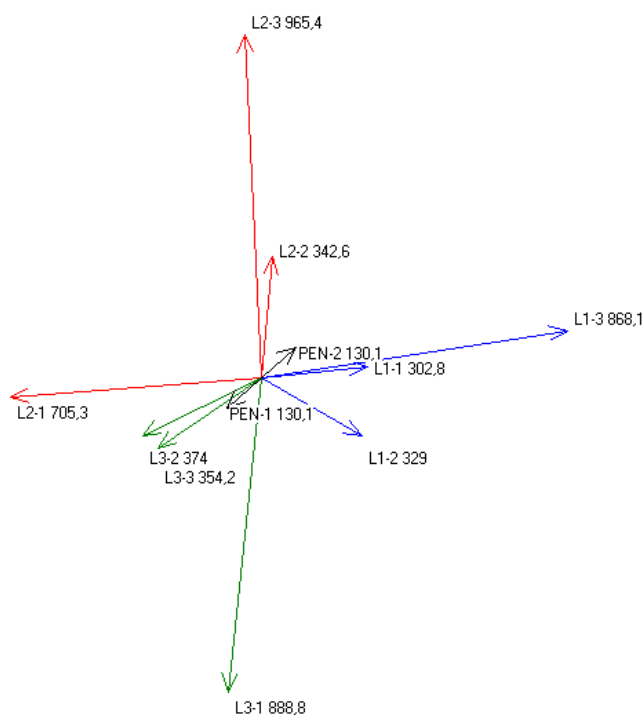
Slika 3.4.18: Tokovi pri razvrstitvi vodnikov, ki pripadajo isti fazi, na železno polico, in sicer v vodoravno zaporedje ($S=240 \text{ mm}^2$, $k_n=0,5$, $P_{\text{izg}}=284,24 \text{ W/m}$, $I_z=752,25 \text{ A}$)

S	k_n	k_n
mm ²	za Fe polico	za PVC polico
120	0,5384	0,6365
150	0,5219	0,6152
185	0,5125	0,6024
240	0,4999	0,5865
300	0,4915	0,5768
400	0,4796	0,5643



Slika 3.4.19: Faktorji k_n v odvisnosti od preseka vodnika in materiala nosilne police, za razvrstitev vodnikov, ki je podana na sliki 3.4.18

Pri tem pa ne nastajajo samo velike neenakomernosti v iznosih amplitud tokov. Kazalčni diagram tokov, ki je na sliki 3.4.20, ravno za ta primer prikazuje tudi velike fazne zamike med tokovi, ki tečejo po vodnikih iste faze. Na sliki sta poleg posameznega fazorja navedena oznaka vodnika in absolutna vrednost toka.



Slika 3.4.20: Kazalčni diagram tokov v vodnikih kablovoda, ki je predstavljen na sliki 3.4.18

Najboljša razporeditev tokov v faznih vodnikih se izmed obravnavanih konfiguracij kablovoda doseže pri razporeditvi vodnikov posameznega trifaznega tokokroga v trikotno formo, ki ima na obeh straneh nameščen zaščitni vodnik, skladno s sliko 3.4.16. Kljub temu zdržni tok kablovoda, ki je izveden z vodniki s presekom 300 mm², še ne doseže bremenskega

toka, ki je v obravnavanem primeru enak nazivnemu toku transformatorja. Edina konfiguracija vodnikov, katerih zdržni tok preseže tok bremena je prikazana na sliki 3.4.8, kjer gre za razvrstitev vodnikov v vodoravno zaporedje tako, da so po trije vodniki, ki pripadajo različnim fazam, položeni v skupino, med temi skupinami in na obeh zunanjih straneh kablovoda pa so položeni zaščitni vodniki s preseki, ki so enaki presekom faznih vodnikov. Vzrok je v tem, da imajo vodniki, ki so razvrščeni v trikot, slabši trajno dovoljeni tok in faktor polaganja k_v kot pa vodniki, ki so razvrščeni v vodoravno zaporedje, kar izniči vpliv izboljšane enakomernosti tokov.

Impedance kablovoda in kratkostični tokovi

Pri projektiranju elektroenergetskih sistemov je potrebno na koncu posameznega tokokroga poznati vrednosti najmanjših in največjih kratkostičnih tokov. Najmanjši kratkostični tok je merodajen za kontrolo zaščite pred posrednim dotikom, največji pa za kontrolo kratkostične in termične trdnosti postrojev med trajanjem kratkega stika. Za izračune kratkostičnih tokov pa je treba poznati vrednosti impedanc kablovodov.

Na tem mestu so za obravnavane načine polaganja vodnikov podane tabele kratkostičnih tokov, in sicer za vodnike s presekom 240 mm^2 , ki so položeni na železne police v dolžini 20 m in nekaj zanimivih primerov razvrstitev kratkostičnih tokov. Pri izračunih je bila v kratkostični tokokrog vključena tudi impedanca transformatorja Z_t . Njeni komponenti sta bili določeni s sklopom enačb (3.4.9).

$$Z_t = \frac{u_k U_n^2}{S_n 100} \quad R_t = \frac{P_{cu} U_n^2}{S_n^2} \quad X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2} \quad (3.4.9)$$

Transformator z nazivno močjo $S_n=1000 \text{ kVA}$, kratkostično napetostjo $u_k=5,68 \%$ in nazivnimi izgubami v bakru $P_{cu}=11460 \text{ W}$, ima naslednje vrednosti direktne upornosti in direktne reaktance: $R_t=1,8336 \text{ m}\Omega$ $X_t=8,9011 \text{ m}\Omega$.

Nični komponenti impedance se lahko določi s pomočjo znanih okvirnih razmerij (enačbi 3.4.10 in 3.4.11) med nično in direktno upornostjo oziroma reaktanco, ki veljajo za določeno območje moči in določeno družino transformatorjev. Za tristebne razdelilne transformatorje moči 1 MVA, primarne napetosti 10 kV in vezave trikot-zvezda (Dyn), standard DIN42504/598 določa, da je:

- razmerje (C_{ro}) med nično in direktno upornostjo v območju od 1,2 do 1,8,
- razmerje (C_{xo}) med nično in direktno reaktanco v območju od 0,95 do 1.

$$R_{t0} = R_t C_{ro} = 1,8336 \cdot 1,8 = 3,3 \text{ m}\Omega \quad (3.4.10)$$

$$X_{t0} = X_t C_{xo} = 8,9011 \cdot 1 = 8,9011 \text{ m}\Omega \quad (3.4.11)$$

Najnižje (najneugodnejše) vrednosti enopolnih kratkostičnih tokov se dobi pri večjih ničnih impedancah, zato je bilo pri izračunih upoštevano, da ima faktor C_{ro} vrednost 1,8, faktor C_{xo} pa vrednost 1.

V nadomestnem vezju za izračune enopolnih kratkih stikov sta v dodatni impedanci \underline{Z}_m upoštevani direktna in nična impedanca transformatorja tako, da fazna napetost požene enak kratkostični tok \underline{I}_{k1} , kot če bi ga določili po metodi simetričnih komponent (enačba 3.4.12).

$$\underline{I}_{k1} = \frac{\sqrt{3}U_n}{2\underline{Z}_{dt} + \underline{Z}_{0t}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_m} \Rightarrow \underline{Z}_m = \frac{2\underline{Z}_{dt} + \underline{Z}_{0t}}{3} \quad (3.4.12)$$

$$\underline{Z}_{dt} = R_t + jX_t \quad \underline{Z}_{0t} = R_{0t} + jX_{0t}$$

S pomočjo računalniškega programa so bili najprej določeni tokovi v posameznih vodnikih, skupni tok kratkega stika pa je bil določen s seštevanjem posameznih tokov v zaščitnih vodnikih, skladno z enačbo (3.4.13).

$$\underline{I}_{k1} = - \sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i \quad (3.4.13)$$

Kratkostična impedanca, ki je vsota impedanc transformatorja, faznih in zaščitnih vodnikov, je bila določena s kvocientom znane napetosti faze, ki je v stiku z zaščitnim vodnikom, in tokom kratkega stika (enačba 3.4.14).

$$\underline{Z}_k = \frac{U_L}{\underline{I}_{k1}} = - \frac{U_L}{\sum_{i=3n+1}^{3n+m} \underline{I}_i} = \frac{2\underline{Z}_{dt} + \underline{Z}_{0t}}{3} + \frac{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_0}{3} \quad (3.4.14)$$

Izračuni enopolnih kratkih stikov večinoma zahtevajo vsoto dvojne direktne in nične impedance posameznih elementov omrežja (transformatorji, kablovodi). Zato je program napisan tako, da je impedanca kablovoda podana že kar v obliki prej omenjene vsote ($2\underline{Z}_d + \underline{Z}_0$). Na ta način so podani tudi rezultati v sledečih tabelah.

Impedanca kablovoda je bila določena po enačbi (3.4.15), katero se izpelje iz enačbe (3.4.14).

$$2\underline{Z}_d + \underline{Z}_0 = -3 \frac{\underline{U}_L}{3n+m} - (2\underline{Z}_{di} + \underline{Z}_{0i}) \quad (3.4.15)$$

$$\sum_{i=3n+1} \underline{I}_i$$

Na slikah 3.4.21a in 3.4.21b je za različne načine razvrščanja vodnikov podan tabelaričen prikaz upornosti ($2R_d+R_o$), reaktanc ($2X_d+X_o$) in absolutnih vrednosti impedanc ($2Z_d+Z_o$), in sicer za kablovod, ki je sestavljen iz treh paralelno vezanih tokokrogov. Kablovod sestavlja dvanajst bakrenih vodnikov s presekom 240 mm^2 , med katerimi so trije zaščitni in devet faznih vodnikov. Zaradi primerljivosti rezultatov pri raznih razvrstitvah, so uporabljeni vedno po trije zaščitni vodniki. Na teh slikah je tudi grafični prikaz razporeditve vodnikov, kjer so fazni vodniki označeni s simbolom L_{xy} . Indeks x definira fazo oziroma snop, indeks y pa označuje zaporedno številko vodnika v tem snopu paralelno priključenih vodnikov. Zeleni vodniki so zaščitni vodniki, rdeči so fazni vodniki v stiku z zaščitnimi, modri pa so "zdravi" fazni vodniki.

Iz rezultatov izračunov (sliki 3.4.21a in 3.4.21b) je razvidno, da se pri isti vrsti kablovoda impedanca $2Z_d+Z_o$ spreminja glede na to, katera faza je v kratkem stiku. Vzrok je v tem, da zaradi geometrijske in snovne nesimetrije kablovoda različnim enopolnim stikom pripadajo različne konfiguracije elektromagnetnega polja, kar pomeni, da se pri tem v največji meri spreminja imaginarna komponenta impedance. Pri izračunih najmanjših kratkostičnih tokov je zato najbolj smiselno uporabiti reaktanco z največjim iznosom, saj se v tem primeru dobi najbolj neugoden tok enopolnega kratkega stika oziroma največji čas delovanja kratkostične zaščite. Predpisi za fiksne porabnike določajo, da mora biti v TN sistemu inštalacij čas delovanja zaščite manjši od 5 s.

Največje impedance dobimo pri nameščanju vodnikov na feromagnetne police po sistemu V4, najmanjše pa v sistemu T3, in sicer pri uporabi plastičnih polic (sliki 3.4.21a in 3.4.21b).

Kratek stik	Vodniki na PVC polici					Vodniki na železni polici				
	$2R_d+R_o$	$2X_d+X_o$	$ 2Z_d+Z_o $	K_z	I_{kl}	$2R_d+R_o$	$2X_d+X_o$	$ 2Z_d+Z_o $	K_z	I_{kl}
	(mΩ)	(mΩ)	(mΩ)		(kA)	(mΩ)	(mΩ)	(mΩ)		(kA)
V1 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,9252	8,5810	9,4362	2,09	18,7	4,5338	11,6745	12,5239	2,78	17,2
L ₂ -PEN	3,9930	10,0337	10,7990	2,39	18,0	4,7138	14,0670	14,8357	3,29	16,3
L ₃ -PEN	4,2852	10,4481	11,2927	2,50	17,8	5,2065	14,5923	15,4933	3,44	16,0
V2 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,5723	5,8786	6,8789	1,53	20,1	4,0806	7,6723	8,6900	1,93	19,1
L ₂ -PEN	3,5483	6,5719	7,4686	1,66	19,8	4,1537	8,9947	9,9075	2,20	18,5
L ₃ -PEN	3,7149	5,9083	6,9792	1,55	20,1	4,4957	8,0248	9,1983	2,04	18,9
V3 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,2339	4,1306	5,2459	1,16	21,2	3,3536	4,9355	5,9670	1,32	20,7
L ₂ -PEN	3,1222	4,5130	5,4878	1,22	21,0	3,2168	5,5472	6,4124	1,42	20,4
L ₃ -PEN	3,0625	3,4216	4,5919	1,02	21,7	3,1557	3,9781	5,0778	1,13	21,4
V4 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,8537	8,9247	9,7211	2,16	18,5	4,4797	12,1775	12,9754	2,88	17,0
L ₂ -PEN	4,4902	13,7117	14,4282	3,20	16,4	6,1418	20,2396	21,1509	4,69	14,2
L ₃ -PEN	4,5514	16,9821	17,5814	3,90	15,3	6,7024	26,3797	27,2178	6,03	12,6
V5 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,6632	7,5136	8,3591	1,85	19,3	4,1977	9,9249	10,7761	2,39	18,0
L ₂ -PEN	4,2236	9,4277	10,3306	2,29	18,2	5,6438	13,3468	14,4910	3,21	16,4
L ₃ -PEN	4,2075	7,7646	8,8313	1,96	19,0	5,8676	11,7041	13,0925	2,90	17,0

Slika 3.4.21a : Upornosti, reaktance, absolutne impedance in tokovi pri enopolnih kratkih stikih (kratkostične tokove duši tudi impedanca transformatorja), in sicer pri razvrščanju vodnikov v plast

Faktor K_z podaja razmerje posamezne absolutne impedance $|2Z_d+Z_o|$ in taiste najmanjše absolutne impedance iz nabora vseh obravnavanih razporeditev vodnikov. Na slikah je poleg vsakega vodnika naveden še kratkostični tok (v kA), ki nastane v primeru stika snopa vodnikov tretje faze z zaščitnimi vodniki, in sicer pri polaganju vodnikov na feromagnetno kabelsko polico.

Kratek stik	Vodniki na PVC polici					Vodniki na železni polici				
	$2R_d+R_o$	$2X_d+X_o$	$ 2Z_d+Z_o $	K_z	I_{kl}	$2R_d+R_o$	$2X_d+X_o$	$ 2Z_d+Z_o $	K_z	I_{kl}
	(mohm)	(mohm)	(mohm)		(kA)	(mohm)	(mohm)	(mohm)		(kA)
T1 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,8971	8,5894	9,4321	2,09	18,7	4,5173	11,6759	12,5193	2,78	17,2
L ₂ -PEN	4,0980	9,8462	10,6649	2,36	18,1	4,9018	13,5939	14,4506	3,20	16,4
L ₃ -PEN	3,8587	9,8056	10,5375	2,34	18,1	4,3960	12,3767	13,1342	2,91	17,0
T2 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,5426	5,8125	6,8069	1,51	20,2	4,0950	7,6508	8,6777	1,92	19,1
L ₂ -PEN	3,6376	5,8235	6,8662	1,52	20,2	4,3764	7,8757	9,0100	2,00	19,0
L ₃ -PEN	3,4729	6,5823	7,4423	1,65	19,8	3,9578	7,8219	8,7662	1,94	19,1
T3 L ₃ -PEN, Fe polica										
L ₁ -PEN	3,2129	3,7448	4,9342	1,09	22,1	3,3223	4,3154	5,4461	1,21	21,6
L ₂ -PEN	3,1073	3,2689	4,5101	1,00	22,1	3,2061	3,6900	4,8883	1,08	21,4
L ₃ -PEN	3,1280	4,4831	5,4665	1,21	21,5	3,1980	4,7748	5,7468	1,27	21,3

Slika 3.4.21b : Upornosti, reaktance, absolutne impedance in tokovi kablovoda pri enopolnih kratkih stikih (kratkostične tokove (I_{kl}) duši tudi impedanca transformatorja), pri razporejanju vodnikov v trikotno formo ($S=240 \text{ mm}^2$)

Največje razlike med obravnavanimi impedancami (pri enopolnem kratkem stiku) nastopajo pri kablovodu V4, položenem na feromagnetno polico (slika 3.4.22a). Razmerje absolutnih vrednosti impedanc pri kratkih stikih L₃-PEN in L₁-PEN znaša kar 2.1, najmanjši (najneugodnejši) kratkostični tok pa znaša 12,6 kA. Vzrok je v tem, da so vodniki posamezne faze položeni eden poleg drugega. Zato je zanka vodnikov L₃-PEN dvakrat širša od zanke vodnikov L₁-PEN, kar pomeni, da pri stiku L₃-PEN nastopa približno dvakrat večja induktivna komponenta impedance.

Če bi pri načrtovanju kablovoda V4 uporabljali impedance konfiguracije T3, bi naračunali okvarni tok, ki znaša približno 20 kA. S tem bi naleteli na situacijo, ko bi bil dejanski najneugodnejši tok kratkega stika približno za 40 % manjši od predvidenega, kar ima lahko za posledico nepravilno izbiro zaščitnih naprav za zaščito pred posrednim dotikom (varovalke, odklopniki). Primerjava z razvrščanjem vodnikov po načinu T3 je omenjena zato, ker je ta sistem zelo blizu razvrstitvi vodnikov v štirižilnih kablích. Impedance večžilnih kablov (za en tokokrog) pa so praktično edine, ki se jih da poiskati v priročnikih in katalogih. Opaža se, da so pri projektiranju večkrat privzeti kar podatki večžilnih kablov, ne glede na dejansko razporeditev vodnikov.

Najmanjša impedanca nastopa pri kablovodu z oznako T3 (slika 3.4.21b), ki je inštaliran na plastično polico, največja pa pri kablovodu z oznako V4, ki je položen na feromagnetni polici, torej pri kablovodu, pri katerem dobimo tudi največjo neenakomernost razporeditve tokov. Uporaba kablovoda V4 ni smiselna in sicer iz treh razlogov:

- kablovod ima veliko neenakomernost tokov in zato majhen zdržni tok,
- kablovod ima velike toplotne izgube in
- kablovod ima največje kratkostične impedance, kar ni ugodno s stališča zaščite pred posrednim dotikom.

Razlike med posameznimi kratkostičnimi tokovi so mnogo manjše od razlik med impedancami kablovoda, ker je bilo pri izračunih upoštevano tudi dušenje transformatorja, ki ima pri enopolnem kratkem stiku relativno veliko impedanco ($2Z_{ld}+Z_{lo}=6,97+j26,7 \text{ m}\Omega$) glede na impedanco kablovoda. Pri daljšem kablovodu bi bile impedance kablovoda večje, zato bi za različne geometrije kablovodov dobili tudi večje razlike med kratkostičnimi tokovi. V obravnavanih primerih so te razlike manjše, saj dolžina kablovoda znaša samo 20 m.

Največji zdržni tok in spodobno razvrstitev tokov ponuja konfiguracija V3 (slika 3.4.21a),

kjer so tokovi enopolnih kratkih stikov primerljivi s kratkostičnimi tokovi v vodnikih kablovoda T3 (slika 3.4.21b). S konfiguracijo V3 dobimo dovolj visok zdržni tok, kot tudi precej visoke enopolne kratkostične tokove, kar je ugodno s stališča hitrosti reagiranja varovalk in odklopnikov.

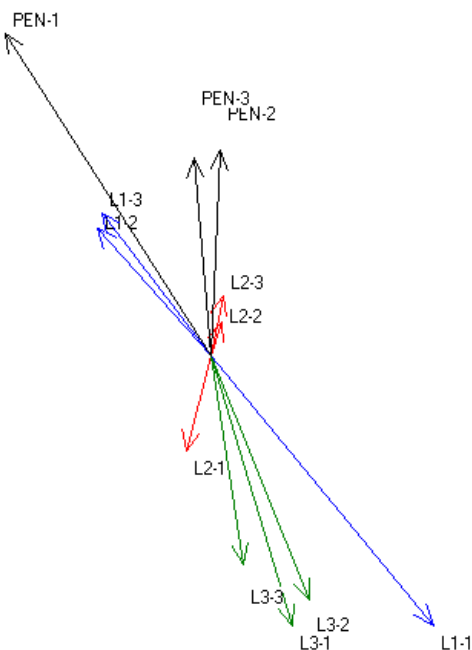
Vodnike, ki sestavljajo paralelno vezane tokokroge, je možno pretokovno in kratkostično ščititi posamično ali pa skupno. Zaradi ekonomskih razlogov se paralelno vezani tokokrogi pogosto ščitijo skupno. Slaba lastnost skupne zaščite je, da ni nadzora nad preobremenitvijo posameznih vodnikov kablovoda, če se tokovi porazdelijo neenakomerno, kar pa se lahko zgodi tudi v primeru oslabljenih kontaktnih upornosti in seveda zaradi geometrijske in snovne nesimetrije kablovoda. Neenake kontaktne upornosti posameznih vodnikov kablovoda, na porazdelitev tokov vplivajo tem bolj, čim krajši so kablovodi in čim večji so preseki vodnikov. Zaradi teh dveh razlogov lahko nenadzorovano pride do pregrevanja posameznih vodnikov, s tem pa lahko do neželenih pojavov, kot so požari z vsemi možnimi posledicami.

Pri kratkostičnih razmerah je zanimiv primer razvrstitve tokov pri kratkem stiku med vodniki faze L_3 in zaščitnimi vodniki, in sicer v sistemu V1 (slika 3.4.21a), kjer so vodniki položeni na feromagnetno polico. V tem primeru so nekateri vodniki faze L_1 , ki sploh niso v kratkem stiku, "kratkostično" bolj obremenjeni kot pa vodniki faze L_3 , ki so dejansko v galvanskem stiku z zaščitnimi vodniki. Grafični prikaz razporeditve tokov za ta primer je na sliki 3.4.22, kjer prikazani vrstni red tokov ni enak vrstnemu redu vodnikov na polici. Največji kratkostični tok steče po vodniku L_{11} , v ostalih vodnikih pa tokovi, ki ravno tako niso zanemarljivi. Skupni kratkostični tok vodnikov faze L_3 znaša 17,8 kA.



Slika 3.4.22 : Razporeditev tokov kablovoda V1 na železni polici (slika 3.4.22a), v primeru kratkega stika med vodniki faze L_3 in zaščitno nevtralnimi vodniki; $I_{kl}=17,8$ kA

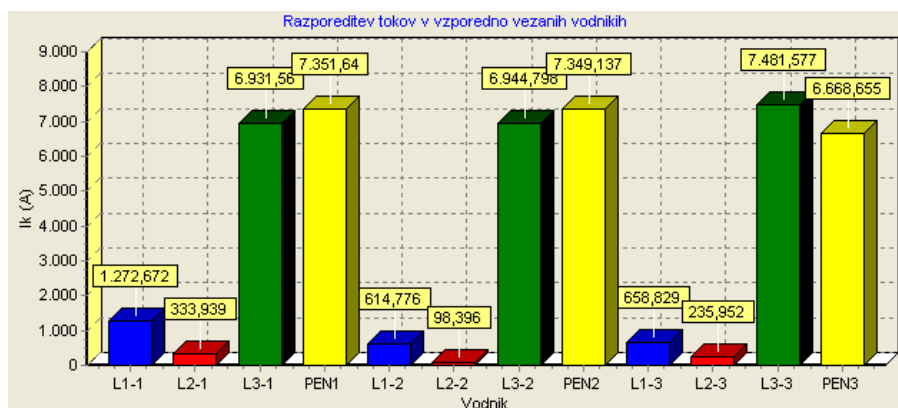
V kolikor so vodniki ščiteni posamično s taljivimi varovalkami, bi slednje lahko reagirale tudi v ostalih dveh "zdravih" fazah, še zlasti v fazi L_1 . To lahko povzroča težave pri iskanju napak v elektroinštalaciji. Pri uporabi odklopnikov so izklopi tripolni, tako da vedno pride do izklopa vseh vodnikov kablovoda. Na sliki 3.4.23 je za isti primer podan kazalčni diagram tokov, iz katerega so razvidni veliki fazni zamiki med tokovi v snopih vodnikov faze L_1 in L_2 .



Slika 3.4.23 : Kazalčni diagram tokov, ki pripada razvrstitvi vodnikov V1 (slika 3.4.22a), pri kratkem stiku med vodniki faze L_3 in zaščitnimi vodniki (PEN)

Večji delež induciranih tokov v faznih vodnikih, ki niso v galvanskem stiku z zaščitnimi vodniki, se da uspešno odpraviti s polaganjem vodnikov po sistemih V3 (slika 3.4.21a) in T3 (slika 3.4.21b), torej z razvrščanjem vodnikov, ki ne pripadajo isti fazi, v vodoravno zaporedje ali trikot, poleg posameznega tokokroga pa se položi še zaščitni vodnik. Za sistem V3 dobimo razvrstitev kratkostičnih tokov, ki je podana na sliki 3.4.24, kjer se vidi, da kratkostične zanke, ki jih tvorijo zaščitni vodniki, uspešno dušijo magnetno polje, ki prodira med faznimi vodniki. To se pozna tudi na kratkostičnem toku, ki v tem primeru znaša 21,7 kA in je glede na kablovod V1 večji za 3,9 kA.

Tokovi v vodnikih faze L_3 so nekajkrat večji od tokov v ostalih fazah, zato bodo varovalke prej izklopile vodnike faze L_3 , kot pa na primer vodnik L_{11} v katerem teče kar velik tok (v iznosu 1272 A).



Slika 3.4.24 : Razporeditev tokov v vodnikih konfiguracije V3 (slika 3.4.21a), ki so položeni na železno polico, pri stiku vodnikov faze L_3 z zaščitnimi vodniki; $I_{k1}=21,7$ kA

Pri določanju kratkostične zaščite je potrebno poznati najmanjše možne kratkostične tokove. V kablovodu V3 dobimo najmanjši možni kratkostični tok v posameznem vodniku pri stiku L_1 -PEN. Najmanjši tok takrat steče po vodniku L_{11} ($I_{11}=4413,5$ A), kar je smiselno upoštevati pri določanju kratkostične zaščite.

Za kontrolo segrevanja kablov in preverjanje mehanske zdržnosti elementov omrežja je treba poznati največje kratkostične tokove, ki v ozemljenih omrežjih najpogosteje nastopajo pri tripolnih kratkih stikih. S pomočjo računalniškega programa je bil zato napravljen tudi izračun impedanc in kratkostičnih tokov, ki nastopajo pri tripolnem kratkem stiku. Pri tem je bilo predpostavljeno, da fazni vodniki niso v galvanskem stiku z zaščitnimi vodniki, upoštevana pa je bila seveda povezava s temi vodniki preko elektromagnetnega polja. Na slikah 3.4.25a in 3.4.25b so v zvezi s tem tabelarično predstavljeni rezultati, iz katerih je razvidno, da ima najmanjšo impedanco kablovod z oznako T3, ki je inštaliran na PVC polico, največjo pa ima kablovod z oznako V4, ki je položen na feromagnetno polico.

Iznosi kratkostičnih tokov se pri različnih vrstah polaganja vodnikov zelo malo spreminjajo, in se gibljejo v območju med 23,9 kA in 18,9 kA, saj večji delež impedance kratkostičnega tokokroga predstavlja impedanca transformatorja. Pri daljšem kablovodu bi dobili večje impedance kablovodov in s tem večje variiranje iznosov kratkostičnih tokov.

	Vodniki na PVC polici					Vodniki na železni polici				
	Re(Z_{k3})	Im(Z_{k3})	Z_{k3}	K_z	I_{k3}	Re(Z_{k3})	Im(Z_{k3})	Z_{k3}	K_z	I_{k3}
	(m Ω)	(m Ω)	(m Ω)		(kA)	(m Ω)	(m Ω)	(m Ω)		(kA)
V1										
L ₁	0,4208	0,5636	0,7034	1,15	23,6	0,3774	0,6467	0,7488	1,23	23,3
L ₂	0,4687	0,5833	0,7483	1,23	23,8	0,4592	0,7103	0,8458	1,39	23,6
L ₃	0,6212	0,5806	0,8503	1,40	23,6	0,7078	0,6731	0,9768	1,60	23,3
V2										
L ₁	0,4242	0,5579	0,7009	1,15	23,7	0,3791	0,6471	0,7500	1,23	23,4
L ₂	0,4900	0,5837	0,7621	1,25	23,8	0,4947	0,7100	0,8653	1,42	23,6
L ₃	0,5868	0,5307	0,7912	1,30	23,7	0,6550	0,6000	0,8883	1,46	23,4
V3										
L ₁	0,3435	0,6305	0,7180	1,18	23,4	0,2610	0,7647	0,8080	1,33	23,1
L ₂	0,4533	0,5912	0,7449	1,22	23,8	0,4347	0,7195	0,8406	1,38	23,6
L ₃	0,6846	0,6837	0,9676	1,59	23,3	0,8016	0,8456	1,1652	1,91	22,9
V4										
L ₁	-0,0092	1,9130	1,9130	3,14	20,8	-0,2905	2,8767	2,8914	4,75	19,1
L ₂	0,5929	1,4523	1,5687	2,58	22,2	0,7170	2,0532	2,1748	3,57	21,2
L ₃	1,3805	1,7963	2,2655	3,72	20,6	2,1049	2,5290	3,2904	5,40	18,9
V5										
L ₁	0,2425	1,6580	1,6757	2,75	21,3	0,0994	2,4868	2,4888	4,09	19,8
L ₂	0,6578	1,4623	1,6034	2,63	22,2	0,8336	2,0619	2,2241	3,65	21,2
L ₃	1,1302	1,3217	1,7390	2,86	21,4	1,6287	1,8291	2,4491	4,02	20,0

Slika 3.4.25a : Upornosti, reaktance, absolutne impedance in tokovi kablovoda pri tripolnih kratkih stikih (kratkostične tokove (I_{k3}) duši tudi impedance transformatorja) za vodoravno razvrstitev vodnikov ($S=240 \text{ mm}^2$). Tokovi v posameznih vodnikih, ki so navedeni v ilustracijah geometrije kablovoda, so podani v kA in veljajo za kablovode na feromagnetnih kabelskih policah.

	Vodniki na PVC polici					Vodniki na železni polici				
	Re(Z_{k3})	Im(Z_{k3})	Z_{k3}	K_z	I_{k3}	Re(Z_{k3})	Im(Z_{k3})	Z_{k3}	K_z	I_{k3}
	(m Ω)	(m Ω)	(m Ω)		(kA)	(m Ω)	(m Ω)	(m Ω)		(kA)
T1										
L ₁	0,3838	0,5342	0,6578	1,08	23,8	0,1481	0,7378	0,7525	1,24	23,8
L ₂	0,6177	0,5505	0,8274	1,36	23,7	0,8813	0,7473	1,1555	1,90	23,6
L ₃	0,4918	0,6723	0,8330	1,37	23,4	0,4877	0,4083	0,6360	1,04	23,3
T2										
L ₁	0,3777	0,5403	0,6592	1,08	23,9	0,1388	0,7511	0,7638	1,25	23,8
L ₂	0,6344	0,5228	0,8221	1,35	23,7	0,9067	0,7079	1,1503	1,89	23,6
L ₃	0,4736	0,6670	0,8180	1,34	23,4	0,4605	0,3986	0,6091	1,00	23,3
T3										
L ₁	0,4364	0,5558	0,7066	1,16	23,7	0,2439	0,7514	0,7900	1,30	23,5
L ₂	0,5265	0,5990	0,7975	1,31	23,6	0,7162	0,8149	1,0848	1,78	23,4
L ₃	0,5050	0,6446	0,8188	1,34	23,5	0,5127	0,4196	0,6625	1,09	23,4

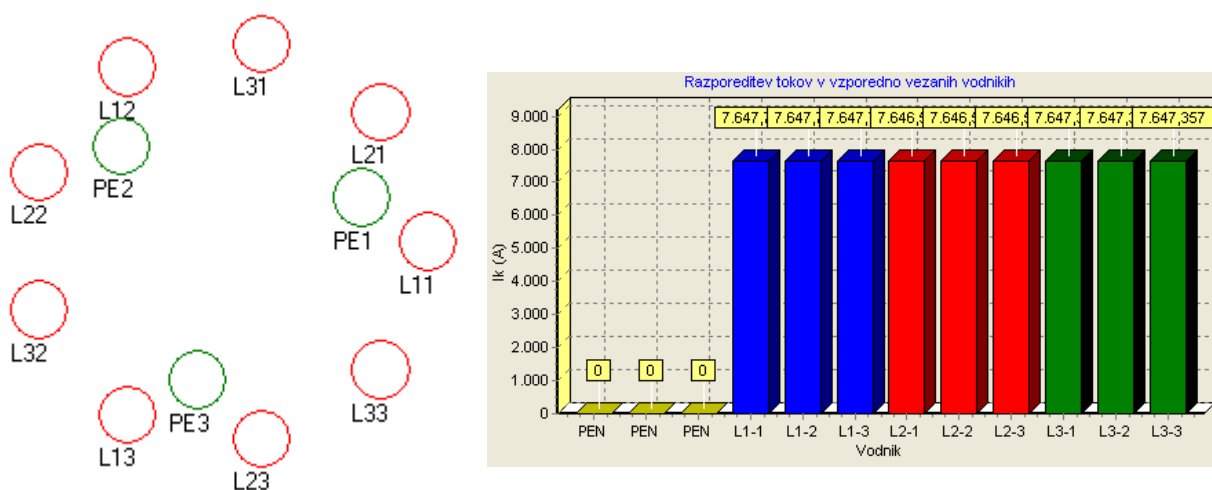
Slika 3.4.25b : Upornosti, reaktance, absolutne impedance in tokovi kablovoda pri tripolnih kratkih stikih (kratkostične tokove (I_{k3}) duši tudi impedance transformatorja) pri razporejanju vodnikov v trikotno formo. Tokovi v posameznih vodnikih, ki so navedeni v ilustracijah geometrije kablovoda, veljajo za kablovode na feromagnetnih kabelskih policah.

Te impedance se lahko uporabijo pri kratkostičnih izračunih kablovodov, ki so serijsko vezani z obravnavanim kablovodom. To je smiselno napraviti le tedaj, če obravnavani kablovod bistveno prispeva k dušenju tripolnega kratkega stika, v večini primerov pa se impedance kratkih in močnih kablovodov zanemarijo. To pomeni, da bomo naračunali nekoliko višji tok

tripolnega kratkega stika v ostalih (serijskih) kablovodih, kar pa s stališča projektiranja ni nič narobe, saj se določa največji pričakovani tok kratkega stika.

Pri vseh obravnavanih načinih polaganja vodnikov, ki so v praksi najlažje izvedljivi, nastopa neka večja ali manjša neenakomernost porazdelitve tokov v posameznih vodnikih kablovoda, in sicer pri normalni simetrični obremenitvi in pri raznih kratkostičnih obremenitvah. V vseh primerih tudi v nevtralnno zaščitnih vodnikih tečejo večji ali manjši tokovi, ki so posledica induciranih napetosti zaradi magnetnih polj tokov v ostalih vodnikih.

Popolnoma enakomerno razporeditev tokov lahko dobimo pri popolni geometrijski in snovni simetriji. Na sliki 3.4.26 je prikazan primer razporeditve vodnikov, ki zagotavlja popolnoma enakomerno razporeditev tokov v faznih vodnikih. Gre za polaganje osi vodnikov na krožnico tako, da so vodniki različnih faz položeni eden za drugim, in sicer z enakimi medsebojnimi razdaljami. Osi nevtralnno zaščitnih vodnikov so položene na drugo krožnico (polmer znaša 85,3 mm), ki ima središče v isti točki, kot krožnica s faznimi vodniki.



Slika 3.4.26: Tokovi pri razvrstitvi vodnikov kablovoda v krožno formo ($S=240 \text{ mm}^2$, $l=20 \text{ m}$, polmer krožnice je 100 mm), pri tripolnem kratkem stiku in z upoštevanjem impedance transformatorja

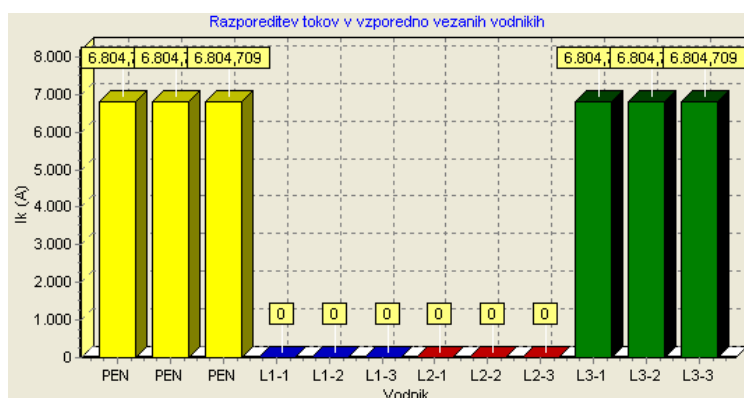
Pri tem je značilno to, da v nevtralnno zaščitnih vodnikih ni induciranih tokov. Impedance vseh treh faz so medsebojno enake in v tem primeru znašajo $(0,486+j0,895) \text{ m}\Omega$. Joulske izgube pri obremenitvi kablovoda z nazivnim tokom transformatorja moči 1 MVA ($I_{nI}=1443,37 \text{ A}$) v tem primeru znašajo 154,41 W/m in so najmanjše izmed izgub v obravnavanih primerih. Glede na kablovod na sliki 3.4.14, so se izgube zmanjšale za približno 7,8 %. V tabeli na sliki 3.4.27 so podane impedance kablovoda pri različnih polmerih krožnice.

Polmer krožnice (mm)	\underline{Z} (m Ω)	I_{k3} (kA)
60	0,486+j0,681	23,43
70	0,486+j0,745	23,28
80	0,486+j0,801	23,15
90	0,486+j0,850	23,04
100	0,486+j0,895	22,94
110	0,486+j0,935	22,85

Slika 3.4.27: Impedance kablovoda in kratkostični tokovi pri različni polmerih razvrščanja vodnikov po sliki 3.4.26 ($S=240 \text{ mm}^2$, $l=20 \text{ m}$, polmer polaganja zaščitnih vodnikov je polmer polaganja faznih vodnikov, zmanjšan za premer vodnika).

Upornosti so pri različnih polmerih polaganja vodnikov konstantne, reaktance pa z večanjem polmerov naraščajo, kar je posledica povečanega magnetnega pretoka med posameznimi vodniki. Zaradi majhne dolžine kablovoda sprememba reaktance nima velikega vpliva na tripolni kratkostični tok.

Pri enopolnih kratkih stikih se v splošnem tudi v snopih faznih vodnikov, ki niso v stiku z zaščitnimi vodniki, inducirajo napetosti in posledično s tem tudi stečejo tokovi, ki pa glede na rezultate prejšnjih izračunov niso ravno zanemarljivi. Za geometrijo razvrščanja vodnikov, ki je predočena na sliki 3.4.26 je na sliki 3.4.28 prikazana porazdelitev tokov pri kratkem stiku med snopom vodnikov faze L_3 in snopom zaščitnih vodnikov.



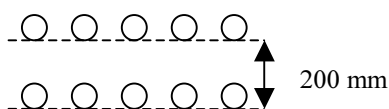
Slika 3.4.28: Tokovi pri razvrstitvi vodnikov kablovoda na sliki 3.4.26 ($S=240 \text{ mm}^2$, $l=20 \text{ m}$, $I_{k1}=20,41 \text{ kA}$), pri enopolnem kratkem stiku vodnikov faze L_3 z zaščitnimi vodniki in z upoštevanjem impedanc transformatorja moči 1 MVA.

Iz slike 3.4.28 je razvidno, da kratkostični tokovi tečejo samo v vodnikih, ki tvorijo kratkostični tokokrog, ostali vodniki pa so tokovno povsem razbremenjeni. Tudi pri ostalih dveh enopolnih stikih so tokovi razporejeni povsem enakomerno, v zdravih fazah pa ni nobenih tokov. Impedance enopolnih kratkih stikov so za ta primer podane tabelarično na sliki 3.4.29.

	$2Z_d+Z_o$	I_{k1}
Kratek stik	(mΩ)	(kA)
L ₁ -PEN	2,98+j4,41	21,12
L ₂ -PEN	2,978+j4,623	20,99
L ₃ -PEN	2,972+j5,602	20,41

Slika 3.4.29: Impedance kablovoda, ki je definiran na sliki 3.4.26, pri vseh treh enopolnih kratkih stikih

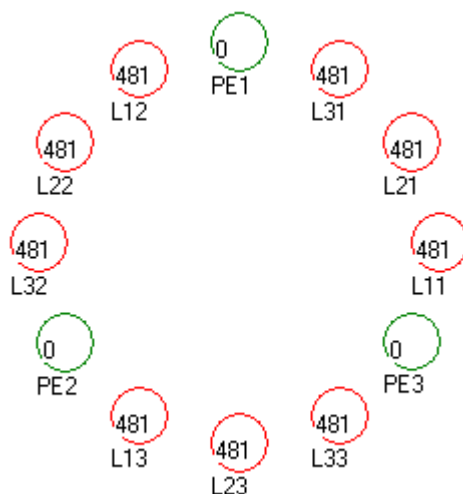
Prednost obravnavanega razvrščanja vodnikov je tudi v izredno dobrem hlajenju kablovoda, kar seveda velja le, če je polmer razvrščanja dovolj velik, tako da so med posameznimi vodniki zagotovljeni dovolj veliki razmiki. Dobro hlajenje in enakomerna obremenitev vodnikov pa zagotavljata izredno dobre zdržne tokove kablovoda. V priročnikih za take primere inštaliranja vodnikov zdržni tokovi niso navedeni, zato se lahko za približno oceno privzame vrednosti trajno dovoljenih tokov in korekcijskih faktorjev pri polaganju vodnikov s svetlim razmikom, ki je večji ali enak premeru vodnika, na dvojno (vodoravno) kabelsko lestev (slika 3.4.30).



Slika 3.4.30: Prikaz polaganja enožilnih vodnikov na dvojno kabelsko lestev

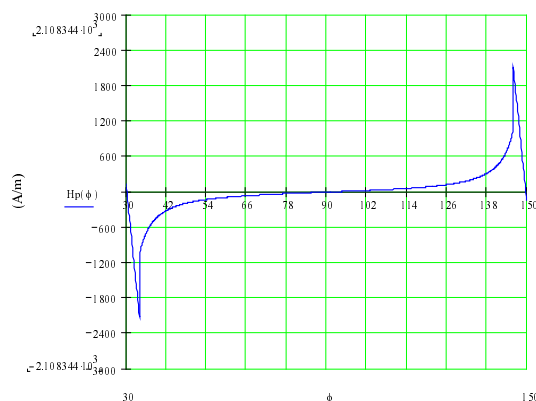
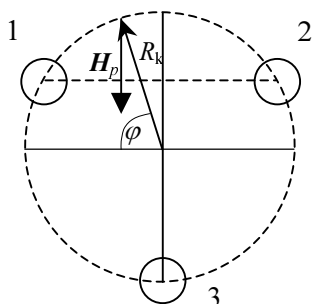
Korekcijski faktor (k_v) za tri paralelne tokokroge (3x PPOO 1x240 mm² + 3x PPOO-Y 1x240 mm²) na dvojni kabelski lestvi in s PVC izolacijo znaša 0,93, trajno dovoljeni tok (I_t) pa 590 A (priročnik Rade Končar, strani 449, 462). Ker je razporeditev tokov praktično enakomerna, se za faktor k_n privzame vrednost 1. Zdržni tok kablovoda tako znaša 1646 A in je kar za približno 203 A večji od nazivnega toka distribucijskega transformatorja nazivne moči 1 MVA.

Enakomerno razporeditev tokov lahko dosežemo tudi z razvrščanjem vodnikov, kjer so zaščitni vodniki postavljeni na isto krožnico kot fazni vodniki (slika 3.4.31). Vodniki so v tem primeru razvrščeni v zaporedju L1-L2-L3-PEN-L1-L2-L3-PEN-....



Slika 3.4.31: Tokovi pri razvrstitvi vodnikov kablovoda v krožno formo ($S=240 \text{ mm}^2$, $l=20 \text{ m}$, polmer krožnice je 100 mm) pri normalni obremenitvi kablovoda

S tem se doseže, da je v prostoru med vodniki, ki so vezani vzporedno, taka razporeditev gostote magnetnega polja, da je magnetni pretok med vodniki enak nič. Zato v vodnikih zaradi zunanega magnetnega polja ni inducirane napetosti, kar ima za posledico enakomerno razporeditev tokov. Na sliki 3.4.32 je podan primer poteka magnetne poljske jakosti H_p med dvema vodnikoma določene faze (vodnika 1 in 2) in sicer v točkah dela krožnice, na katero sta položena ta dva vodnika. H_p je komponenta magnetne poljske jakosti, ki je pravokotna na zveznico med vodnikoma 1 in 2. V vseh treh vodnikih so bili predpostavljene enaki tokovi v iznosu 100 A .



Slika 3.4.32: Magnetna poljska jakost H_p na odseku krožnice med vodnikoma 1 in 2 ($R_k=10 \text{ cm}$)

Pri prenosu večjih moči se v nizkonapetostnih omrežjih uporablja kablovode, ki so sestavljeni iz paralelno vezanih tokokrogov. Slednji so zaradi lažje montaže pogosto izvedeni z enožilnimi vodniki. Vodniki zaradi paralelne vezave tvorijo kratkostične zanke, polaga pa se jih ponavadi na železne kabske police, na katerih ni možno zagotoviti popolne geometrijske in snovne simetrije. Elektromagnetna indukcija, v povezavi z geometrijsko in snovno nesimetrijo kablovoda, povzroča neenakomerno razporeditev skupnega toka po posameznih vodnikih kablovoda. Ker so trajno dovoljeni tokovi v tabelah standardov podani za popolnoma enakomerno porazdeljene tokove, je pri izračunu zdržnega toka kablovoda z neenakomerno razporeditvijo tokov smiselno upoštevati še dodaten korekcijski faktor, ki zagotavlja, da se tokovno najbolj obremenjen vodnik ne bo pregrel preko dopustne temperature. Korekcijski faktor, ki zajame neenakomerno razporeditev tokov je odvisen od načina razvrščanja vodnikov, dimenzij vodnikov in materiala nosilne konstrukcije. V nalogi so prikazani in numerično ovrednoteni najbolj pogosti načini polaganja vodnikov (PPOO 240 mm²) na feromagnetne in plastične kabske police. Na razporeditev tokov in s tem na korekcijski faktor, poleg geometrijske razvrstitve faznih vodnikov in materiala kabskih nosilcev, vpliva tudi razvrstitev zaščitno nevtralnih vodnikov. Izkaže se, da feromagnetni material kabskih polic neenakomernost tokov poveča in s tem zmanjša korekcijski faktor, kar ima za posledico manjši zdržni tok kablovoda, zveča pa tudi kratkostične impedance in izgube kablovoda. Če so zaščitno nevtralni vodniki položeni na obeh straneh kablovoda, dobimo boljšo enakomernost porazdelitve tokov, kot pa če so položeni samo na eni strani kablovoda. Najboljši korekcijski faktor nastopa pri razporeditvi vodnikov, ki pripadajo različnim fazam, v trikotno formo, na obeh straneh posameznega paralelnega tokokroga pa se položi zaščitno nevtralni vodnik. Kljub najboljšemu korekcijskemu faktorju taka razvrstitev, zaradi slabšega hlajenja vodnikov v trikotni razporeditvi, ne zagotavlja tudi največjega zdržnega toka kablovoda. Največji zdržni tok dobimo pri polaganju vodnikov, ki ne pripadajo isti fazi, v vodoravno zaporedje, pri tem pa je na obeh straneh posamezne trojice vodnikov (posameznega tokokroga) položen po en zaščitno nevtralni vodnik (slika 3.4.8). S tako razporeditvijo zaščitnih vodnikov se pri enopolnih kratkih stikih uspešno zaduši tudi relativno velike inducirane tokove v faznih vodnikih, ki sploh niso v galvanskem stiku z zaščitnimi vodniki. Najmanjše impedance tripolnega kratkega stika nastopajo pri razporejanju vodnikov, ki ne pripadajo isti fazi, v vodoravno zaporedje, zaščitni vodniki pa so nameščeni na levo in desno stran kablovoda (način V2 na sliki 3.4.25a). Največji tokovi enopolnega kratkega stika

kot tudi najmanjše toplotne izgube, nastanejo pri polaganju faznih vodnikov v trikotno formo, zaščitni vodniki pa so položeni poleg vsake trojice faznih vodnikov (način T3 3.4.25b). Najslabše razmere se pojavijo pri polaganju vodnikov iste faze v vodoravno zaporedje. Korekcijski faktor ima takrat zaradi neenakomerne obremenitve zelo slabo vrednost ($k_n \approx 0,5$), kar pomeni, da je tak način polaganja vodnikov neprimeren, saj morajo biti vodniki v takih kablovodih močno predimenzionirani, da ne bi prišlo do prekomernega segrevanja posameznih vodnikov.

Toplotne izgube so približno enake pri vseh obravnavanih kablovodih, razen pri konfiguraciji V4 (slika 3.4.18), kjer joulske izgube pri enakih presekih (240 mm^2) in enaki tokovni obremenitvi (1434,37 A) narastejo kar na približno 170 % izgub kablovoda z najmanjšimi izgubami (konfiguracija T3, slika 3.4.14). Pri tem se toplotne izgube v feromagnetnih policah niso izračunavale, ker je poudarek na razporeditvi tokov v kablovodu, sami izračuni pa temeljijo na nadomestnih vezjih in ne na metodi končnih elementov.

Popolnoma enakomerno razvrstitev tokov bi dobili pri razvrstitvi vodnikov na nosilce krožnega preseka, kjer bi bile osi vodnikov razporejene na krožnico po slikah 3.4.26 in 3.4.31. Taka kablovoda imata zaradi geometrijske simetrije enakomerno razporeditev tokov, enake fazne impedance, večji zdržni tok, na katerega vpliva tudi boljše hlajenje, in precej manjše toplotne izgube. Sama inštalacija vodnikov bi bila sicer nekoliko zahtevnejša od inštalacije s kabelskimi policami, vendar bi zaradi manjših presekov prihranili na stroških vodnikov.

Vpliv segrevanja vodnikov je bil pri izračunih zanemarjen, saj je v vseh primernih načinih razvrščanja vodnikov neenakomernost razporeditve tokov relativno majhna, s tem pa so tudi majhne razlike v temperaturah vodnikov in posledično v specifičnih upornostih prevodnika.

Pri načrtovanju in izvajanju inštalacij kablovodov, ki so izvedeni s paralelno vezanimi tokokrogi je torej zelo pomemben način razvrščanja faznih in zaščitno nevtralnih vodnikov. Razvrstitve vodnikov in materiali nosilnih konstrukcij kablovoda vplivajo na neenakomerno razporeditev tokov v snopih paralelno vezanih vodnikov, in sicer pri normalnih in kratkostičnih obremenitvah, kar je treba upoštevati pri izračunu zdržnega toka kablovoda in kratkostičnih razmer. Ravno zato bi morali projektanti vedno predpisati in nazorno predočiti geometrije kablovodov, saj bi se s tem izognili morebitnim neprijetnim situacijam, investitorji pa dodatnim stroškom.

5.**SEZNAM UPORABLJENIH VIROV**

1. Anton Sinigoj, ELMG polje, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1996.
2. Branko Popović, Elektromagnetne strukture (zapiski predavanj v šolskem letu 1991/92).
3. Richard Roeper, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen, Siemens- Aktiengesellschaft, München, 1984.
4. Končar, Tehnički priručnik, SOUR Rade Končar Zagreb, 1980, Zagreb.
5. Jože Mlakar, Osnove električnih vezij in signalov, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1980.
6. Boris Apsen, Repetitorij više matematike, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987.
7. Standard JUS N.B2.752, Trajno dovoljeni toki.

IZJAVA O AVTORSTVU

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorjev doc.dr. Maksa Berleca in prof. dr. Konrada Lenasija. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.